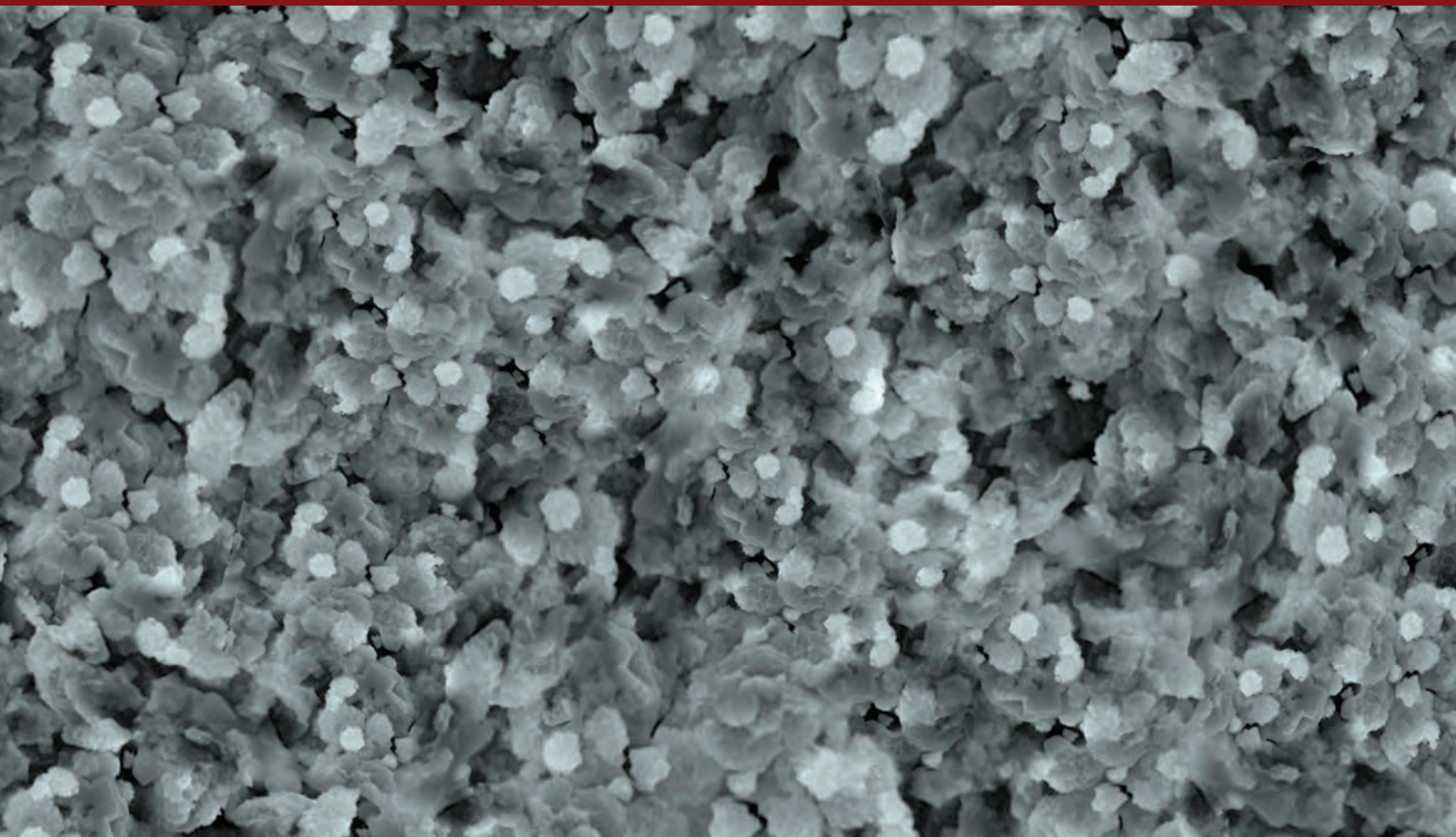


# DYNA

Journal of the Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia - Medellin Campus



DYNA 82 (193), October, 2015 - ISSN 0012-7353

Tarifa Postal Reducida No. 2014-287 4-72

La Red Postal de Colombia, Vence 31 de Dic. 2015.



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA  
SEDE MEDELLÍN  
FACULTAD DE MINAS

DYNA is an international journal published by the Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín Campus since 1933. DYNA publishes peer-reviewed scientific articles covering all aspects of engineering. Our objective is the dissemination of original, useful and relevant research presenting new knowledge about theoretical or practical aspects of methodologies and methods used in engineering or leading to improvements in professional practices. All conclusions presented in the articles must be based on the current state-of-the-art and supported by a rigorous analysis and a balanced appraisal. The journal publishes scientific and technological research articles, review articles and case studies.

DYNA publishes articles in the following areas:

Organizational Engineering  
Civil Engineering  
Materials and Mines Engineering

Geosciences and the Environment  
Systems and Informatics  
Chemistry and Petroleum

Mechatronics  
Bio-engineering  
Other areas related to engineering

## Publication Information

DYNA (ISSN 0012-73533, printed; 2346-2183, online) is published by the Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, with a bimonthly periodicity (February, April, June, August, October, and December). Circulation License Resolution 000584 de 1976 from the Ministry of the Government.

### Contact information

Web page: <http://dyna.unalmed.edu.co>  
E-mail: [dyna@unal.edu.co](mailto:dyna@unal.edu.co)  
Mail address: Revista DYNA  
Facultad de Minas Universidad Nacional de Colombia -  
Medellín Campus  
Carrera 80 No. 65-223 Bloque M9 - Of.:107  
Telephone: (574) 4255068 Fax: (574) 4255343  
Medellín - Colombia

### © Copyright 2014. Universidad Nacional de Colombia

The complete or partial reproduction of texts with educational ends is permitted, granted that the source is duly cited. Unless indicated otherwise.

### Notice

All statements, methods, instructions and ideas are only responsibility of the authors and not necessarily represent the view of the Universidad Nacional de Colombia. The publisher does not accept responsibility for any injury and/or damage for the use of the content of this journal.

The concepts and opinions expressed in the articles are the exclusive responsibility of the authors.

### Institutional Exchange Request

DYNA may be requested as an institutional exchange through the e-mail [canjebib\\_med@unal.edu.co](mailto:canjebib_med@unal.edu.co) or to the postal address:

Biblioteca Central "Efe Gómez"  
Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín  
Calle 59A No 63-20  
Teléfono: (57+4) 430 97 86  
Medellín - Colombia

## Indexing and Databases

DYNA is admitted in:

The National System of Indexation and Homologation of Specialized Journals CT+I-PUBLINDEX, Category A1

Science Citation Index Expanded  
Web of Science - WoS, Thomson Reuters  
Journal Citation Reports - JCR  
SCImago Journal & Country Rank - SJR  
Science Direct  
SCOPUS  
Chemical Abstract - CAS  
Scientific Electronic Library on Line - SciELO  
GEOREF  
PERIÓDICA Data Base  
Latindex  
Actualidad Iberoamericana  
RedALyC - Scientific Information System  
Directory of Open Access Journals - DOAJ  
PASCAL  
CAPES  
UN Digital Library - SINAB  
CAPES  
EBSCO Host Research Databases

### Publisher's Office

Juan David Velásquez Henao, Director  
Mónica del Pilar Rada T., Editorial Coordinator  
Catalina Cardona A., Editorial Assistant  
Amilkar Álvarez C., Diagrammer  
Byron Llano V., Editorial Assistant  
Landsoft S.A., IT

### Reduced Postal Fee

Tarifa Postal Reducida # 2014-287 4-72. La Red Postal de Colombia, expires Dec. 31st, 2015



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN  
FACULTAD DE MINAS

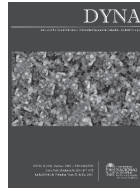
DYNA



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
SEDE MEDELLÍN  
FACULTAD DE MINAS



**UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
DE COLOMBIA**  
SEDE MEDELLÍN  
FACULTAD DE MINAS



**DYNÁ**  
<http://dyna.medellin.unal.edu.co/>

#### COUNCIL OF THE FACULTAD DE MINAS

##### Dean

Pedro Nel Benjumea Hernández PhD

##### Vice-Dean

Ernesto Pérez González, PhD

##### Vice-Dean of Research and Extension

Santiago Arango Aramburo, PhD

##### Director of University Services

Carlos Alberto Graciano, PhD

##### Academic Secretary

Francisco Javier Díaz Serna, PhD

##### Representative of the Curricular Area Directors

Luis Augusto Lara Valencia, PhD

##### Representative of the Basic Units of Academic-Administrative Management

Jorge Eliecer Córdoba Maquilon, PhD

##### Representative of the Basic Units of Academic-Administrative Management

Gloria Inés Jiménez Gutiérrez, MSc

##### Professor Representative

Jaime Ignacio Vélez Upegui, PhD

##### Delegate of the University Council

León Restrepo Mejía, PhD

#### FACULTY EDITORIAL BOARD

##### Dean

Pedro Nel Benjumea Hernández, PhD

##### Vice-Dean of Research and Extension

Santiago Arango Aramburo, PhD

##### Members

Oscar Jaime Restrepo Baena, PhD

Juan David Velásquez Henao, PhD

Jaime Aguirre Cardona, PhD

Mónica del Pilar Rada Tobón, MSc

#### JOURNAL EDITORIAL BOARD

##### Editor-in-Chief

Juan David Velásquez Henao, PhD

Universidad Nacional de Colombia, Colombia

##### Editors

George Barbastathis, PhD

Massachusetts Institute of Technology, USA

Tim A. Osswald, PhD

University of Wisconsin, USA

Juan De Pablo, PhD

University of Wisconsin, USA

Hans Christian Öttinger, PhD

Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Switzerland

Patrick D. Anderson, PhD

Eindhoven University of Technology, the Netherlands

Igor Emri, PhD

Associate Professor, University of Ljubljana, Slovenia

Dietmar Drummer, PhD

Institute of Polymer Technology University Erlangen-Nürnberg, Germany

Ting-Chung Poon, PhD

Virginia Polytechnic Institute and State University, USA

Pierre Boulanger, PhD

University of Alberta, Canadá

Jordi Payá Bernabeu, Ph.D.

Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH)

Universitat Politècnica de València, España

Javier Belzunce Varela, Ph.D.

Universidad de Oviedo, España

Luis Gonzaga Santos Sobral, PhD

Centro de Tecnología Mineral - CETEM, Brasil

Agustín Bueno, PhD

Universidad de Alicante, España

Henrique Lorenzo Cimadevila, PhD

Universidad de Vigo, España

Mauricio Trujillo, PhD

Universidad Nacional Autónoma de México, México

Carlos Palacio, PhD

Universidad de Antioquia, Colombia

Jorge García-Sucerquia, PhD

Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Juan Pablo Hernández, PhD

Universidad Nacional de Colombia, Colombia

John William Branch Bedoya, PhD

Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Enrique Posada, Msc

INDISA S.A, Colombia

Oscar Jaime Restrepo Baena, PhD

Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Moisés Oswaldo Bustamante Rúa, PhD

Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Hernán Darío Álvarez, PhD

Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Jaime Aguirre Cardona, PhD

Universidad Nacional de Colombia, Colombia



## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| A study of the ground plane effect in passband filters using OSRR cells<br>Iván Díaz-Pardo, Carlos Arturo Suárez-Fajardo & Gustavo Adolfo Puerto-Leguizamón                                                                            | 9   |
| Methodological design for the prevention of risk in production processes<br>Alexander De Jesús Pulido-Rojano                                                                                                                           | 16  |
| Learning manager for remote experimentation with optoelectronic devices<br>Duván Fernando García-Cedeño & Álvaro Bernal-Noreña                                                                                                         | 23  |
| A comparative study of two aging and fusion methods in the synthesis of zeolitic materials from natural clinker<br>Jeimer Alexander Lizcano-Cabeza, Luis Fernando Ávila-Ascanio, Carlos Alberto Ríos-Reyes & Luz Yolanda Vargas-Fiallo | 32  |
| Implementation of computing with words in evaluating training program<br>Gerardo Felix-Benjamín, Claudia Calero-Muela, Renier Esquivel-García & Rafael Bello-Pérez                                                                     | 39  |
| Wave energy resource assessment at southern coast of the Gulf of Mexico<br>Alejandro González-Carrillo, Raziel Ruiz-Cabrera, Quetzalcoatl Hernández-Escobedo, Aránzazu Fernández-García & Francisco Manzano-Agugliaro                  | 49  |
| Impact of previous acclimatization of biomass and alternative substrates in sunflower oil biodegradation<br>Pedro Cisterna-Osorio, Antonio Gutiérrez Lavin & Herminio Sastre-Andres                                                    | 56  |
| Analysis of the partial discharge pulse propagation in the stator winding of a synchronous machine<br>José Luis Oslinger-Gutiérrez, Fabio Andrés Muñoz-Muñoz & Jaime Antonio Vanegas-Iriarte                                           | 62  |
| An improvement to the classification based on the measurement of the similarity quality using fuzzy relations<br>Yumilka B. Fernández-Hernández, Yaima Filiberto, Mabel Frias, Rafael Bello & Yaila Caballero                          | 70  |
| Thermal and energy evaluation of a novel polymer-ceramic composite as insulation for a household refrigerator<br>Juan Manuel Belman-Flores, Bárbara González-Rolón, Juan Serrano-Arellano & Sergio Gámez-Arredondo                     | 77  |
| Shear strength of landfills<br>Eimar Andrés Sandoval-Vallejo, Andrés Ramírez-Tascón & Diego Cuarán                                                                                                                                     | 83  |
| Energy efficiency in the zeolite impact crushing plant of San Andrés (Holguín, Cuba)<br>José Ramón Hechavarría-Pérez, Alfredo L. Coello-Velázquez, Fernando Daniel Robles-Proenza & Juan María Menéndez-Aguado                         | 93  |
| A methodology to obtain an analytical formula for the elastic modulus of lightweight aggregate concrete<br>Flávio de Souza-Barbosa, Michèle Cristina Resende-Farage, Aldemon Lage-Bonifácio, Anne-Lise Beaucour & Sophie Ortola        | 98  |
| Wear resistance of vanadium-niobium carbide layers grown via TRD<br>Fabio Enrique Castillejo-Nieto, Jhon Jairo Olaya-Florez & José Edgar Alfonso                                                                                       | 104 |
| Behavior of coated forming tools with TiAlN coatings grown by Triode Magnetron Sputtering<br>Diana Marcela Devia-Narváez, Harold Duque-Sánchez & Fernando Mesa                                                                         | 110 |
| Solution architecture approach, mechanism to reduce the gap between enterprise architecture and implementation of technological solutions<br>Martín Darío Arango-Serna, Jesús Enrique Londoño-Salazar & John Willian Branch-Bedoya     | 117 |
| Development of a digital TV receivers test suite<br>Pablo Flores-Guridi, Gustavo Guimerans, Juan Pablo Garella, Javier Baliosian, Eduardo Grampín, Rafael Sotelo & María Simon                                                         | 127 |
| Channel connections resistance at elevated temperatures<br>Yisel Larrúa-Pardo, Rafael Larrúa-Quevedo & Valdir Pignatta Silva                                                                                                           | 137 |
| Integration model of collaborative supply chain<br>Horacio Bautista-Santos, José Luis Martínez-Flores, Gregorio Fernández-Lambert, María Beatriz Bernabé-Loranca, Fabiola Sánchez-Galván & Neyfe Sablón-Cossio                         | 145 |
| Effects of uncertainty on scheduling of highway construction projects<br>Hernán Darío Gómez & Armando Orobio                                                                                                                           | 155 |
| Mining unstructured data to support requirements elicitation by using controlled vocabularies: A systematic mapping study<br>José L. Barros-Justo                                                                                      | 165 |

|                                                                                                                                                                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Development of a concept-based EMG-based speller<br>Robertas Damaševičius, Mindaugas Vasiljevas & Tomas Šumskas                                                                                                                      | 170 |
| HMI/ SCADA standards in the design of data center interfaces: A network operations center case study<br>Said Filali-Yachou, Carina S. González-González & Carlos Lecuona-Rebollo                                                     | 180 |
| Agile human centered methodologies to develop educational software<br>Carina S. González-González, Pedro Toledo-Delgado & Vanesa Muñoz-Cruz                                                                                          | 187 |
| Prediction of take-over time in highly automated driving by two psychometric tests<br>Moritz Körber, Thomas Weißgerber, Luis Kalb, Christoph Blaschke & Mehdi Farid                                                                  | 195 |
| Comparing the efficiency of performing complex tasks with a tablet and a smartphone<br>Federico Botella, Juan P. Moreno & Antonio Peñalver                                                                                           | 202 |
| Assessing the awareness mechanisms of a collaborative programming support system<br>Ana Isabel Molina, Jesús Gallardo, Miguel Ángel Redondo & Crescencio Bravo                                                                       | 212 |
| A design process for balanced educational video games with collaborative activities<br>Natalia Padilla-Zea, Nuria Medina-Medina, Francisco L. Gutiérrez-Vela, José R. López-Arcos, Patricia Paderewski & Carina S. González-González | 223 |
| Impact of web accessibility barriers on users with a hearing impairment<br>Afra Pascual, Mireia Ribera & Toni Granollers                                                                                                             | 233 |
| Getting-up rehabilitation therapy supported by movement based interaction techniques<br>José Antonio Fernández-Valls a, Victor M. R. Penichet, María Dolores Lozano & Juan E. Garrido                                                | 241 |

**Our cover**  
Image alluding to Article:  
A comparative study of two aging and fusion methods in the  
synthesis of zeolitic materials from natural clinker

**Authors:**  
Jeimer Alexander Lizcano-Cabeza, Luis Fernando Ávila-Ascanio,  
Carlos Alberto Ríos-Reyes & Luz Yolanda Vargas-Fiallo



## CONTENIDO

|                                                                                                                                                                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Estudio del efecto del plano de masa en filtros pasa banda usando celdas OSRR<br>Iván Díaz-Pardo, Carlos Arturo Suárez-Fajardo & Gustavo Adolfo Puerto-Leguizamón                                                                                        | 9   |
| Diseño metodológico para la prevención de riesgos en procesos de producción<br>Alexander De Jesús Pulido-Rojano                                                                                                                                          | 16  |
| Gestor de aprendizaje para la experimentación remota con dispositivos optoelectrónicos<br>Duván Fernando García-Cedeño & Álvaro Bernal-Noreña                                                                                                            | 23  |
| Estudio comparativo de dos métodos de envejecimiento y fusión en la síntesis de materiales zeolíticos a partir de clinker natural<br>Jeimer Alexander Lizcano-Cabeza, Luis Fernando Ávila-Ascanio, Carlos Alberto Ríos-Reyes & Luz Yolanda Vargas-Fiallo | 32  |
| Aplicación de la computación con palabras en la evaluación del impacto de la capacitación<br>Gerardo Felix-Benjamín, Claudia Calero-Muela, Renier Esquivel-García & Rafael Bello-Pérez                                                                   | 39  |
| Evaluación del potencial energético del oleaje en la costa sur del Golfo de México<br>Alejandro González-Carrillo, Raziell Ruiz-Cabrera, Quetzalcoatl Hernández-Escobedo, Aránzazu Fernández-García & Francisco Manzano-Agugliaro                        | 49  |
| Incidencia de la aclimatación previa de la biomasa y sustrato alternativo en la biodegradación de aceite girasol<br>Pedro Cisterna-Osorio, Antonio Gutiérrez Lavín & Herminio Sastre-Andres                                                              | 56  |
| Análisis de la propagación de pulsos de descarga parcial en el devanado del estator de una máquina sincrónica<br>José Luis Oslinger-Gutiérrez, Fabio Andrés Muñoz-Muñoz & Jaime Antonio Vanegas-Iriarte                                                  | 62  |
| Una mejora a la clasificación basada en la medida calidad de la similaridad utilizando relaciones borrosas<br>Yumilka B. Fernández-Hernández, Yaima Filiberto, Mabel Frías, Rafael Bello & Yaila Caballero                                               | 70  |
| Evaluación térmica y energética de un nuevo composite polímero-cerámico como aislante en un refrigerador doméstico<br>Juan Manuel Belman-Flores, Bárbara González-Rolón, Juan Serrano-Arellano & Sergio Gámez-Arredondo                                  | 77  |
| Resistencia al esfuerzo cortante en rellenos sanitarios<br>Eimar Andrés Sandoval-Vallejo, Andrés Ramírez-Tascón & Diego Cuarán                                                                                                                           | 83  |
| Eficiencia energética en la trituración por impactos en la planta de zeolitas de San Andrés (Holguín, Cuba)<br>José Ramón Hechavarría-Pérez, Alfredo L. Coello-Velázquez, Fernando Daniel Robles-Proenza & Juan María Menéndez-Aguado                    | 93  |
| Una metodología para obtener una fórmula analítica para el módulo de elasticidad del hormigón de áridos ligeros<br>Flávio de Souza-Barbosa, Michèle Cristina Resende-Farage, Aldemon Lage-Bonifácio, Anne-Lise Beaucour & Sophie Ortola                  | 98  |
| Resistencia al desgaste de capas de carburo de vanadio-niobio crecidas por medio de TRD<br>Fabio Enrique Castillejo-Nieto, Jhon Jairo Olaya-Florez & José Edgar Alfonso                                                                                  | 104 |
| Comportamiento de las herramientas de conformado con recubrimientos TiAlN crecido por Magnetron Sputtering Trío do<br>Diana Marcela Devia-Narváez, Harold Duque-Sánchez & Fernando Mesa                                                                  | 110 |
| Enfoque de arquitectura de solución, mecanismo para reducir la brecha entre la arquitectura empresarial y la implementación de soluciones tecnológicas<br>Martín Darío Arango-Serna, Jesús Enrique Londoño-Salazar & John William Branch-Bedoya          | 117 |
| Desarrollo de una suite de pruebas para receptores de TV digital<br>Pablo Flores-Guridi, Gustavo Guimerans, Juan Pablo Garella, Javier Baliosian, Eduardo Grampín, Rafael Sotelo & María Simon                                                           | 127 |
| Resistencia de las conexiones tipo canal a elevadas temperaturas<br>Yisel Larrúa-Pardo, Rafael Larrúa-Quevedo & Valdir Pignatta Silva                                                                                                                    | 137 |
| Modelo de integración de cadenas de suministro colaborativas<br>Horacio Bautista-Santos, José Luis Martínez-Flores, Gregorio Fernández-Lambert, María Beatriz Bernabé-Loranca, Fabiola Sánchez-Galván & Neyfe Sablón-Cossío                              | 145 |
| Efectos de la incertidumbre en la programación de proyectos de construcción de carreteras<br>Hernán Darío Gómez & Armando Orobio                                                                                                                         | 155 |
| Minería de datos sin estructura para el soporte de la adquisición de requerimientos mediante el uso de vocabularios controlados: Un estudio de mapeo sistemático<br>José L. Barros-Justo                                                                 | 165 |

|                                                                                                                                                                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Desarrollo de un deletreador basado en conceptos basados en EMG<br>Robertas Damaševičius, Mindaugas Vasiljevas & Tomas Šumskas                                                                                               | 170 |
| Estándares HMI/SCADA para el diseño de interfaces en los centros de datos: El centro de control y operaciones como caso de estudio<br>Said Filali-Yachou, Carina S. González-González & Carlos Lecuona-Rebollo               | 180 |
| Metodologías ágiles centradas en personas para desarrollar software educativo<br>Carina S. González-González, Pedro Toledo-Delgado & Vanesa Muñoz-Cruz                                                                       | 187 |
| Predicción de control sobre el tiempo en conducción altamente automatizada en dos tests psicométricos<br>Moritz Körber, Thomas Weißgerber, Luis Kalb, Christoph Blaschke & Mehdi Farid                                       | 195 |
| Comparando la eficiencia al realizar tareas complejas con una tableta frente a un smartphone<br>Federico Botella, Juan P. Moreno & Antonio Peñalver                                                                          | 202 |
| Evaluando los mecanismos de awareness de un sistema de soporte a la programación colaborativa<br>Ana Isabel Molina, Jesús Gallardo, Miguel Ángel Redondo & Crescencio Bravo                                                  | 212 |
| Proceso de diseño para videojuegos educativos con actividades colaborativas<br>Natalia Padilla-Zea, Nuria Medina-Medina, Francisco L. Gutiérrez-Vela, José R. López-Arcos, Patricia Paderewski & Carina S. González-González | 223 |
| Impacto de las barreras de accesibilidad web en usuarios con discapacidad auditiva<br>Afra Pascual, Mireia Ribera & Toni Granollers                                                                                          | 233 |
| Terapia de rehabilitación de levantarse guiada por medio de técnicas de interacción basada en movimiento<br>José Antonio Fernández-Valls a, Víctor M. R. Penichet, María Dolores Lozano & Juan E. Garrido                    | 241 |

Nuestra carátula  
Imagen alusiva al artículo:  
Estudio comparativo de dos métodos de envejecimiento y fusión  
en la síntesis de materiales zeolíticos a partir de clinker natural

Authors:  
Jeimer Alexander Lizcano-Cabeza, Luis Fernando Ávila-Ascanio,  
Carlos Alberto Ríos-Reyes & Luz Yolanda Vargas-Fiallo



# A study of the ground plane effect in passband filters using OSRR cells

Iván Díaz-Pardo <sup>a</sup>, Carlos Arturo Suárez-Fajardo <sup>b</sup> & Gustavo Adolfo Puerto-Leguizamón <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. [iediazp@udistrital.edu.co](mailto:iediazp@udistrital.edu.co)

<sup>b</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. [csuarezf@udistrital.edu.co](mailto:csuarezf@udistrital.edu.co)

<sup>c</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. [gapuerto@udistrital.edu.co](mailto:gapuerto@udistrital.edu.co)

Received: March 12<sup>th</sup>, 2014. Received in revised form: March 6<sup>th</sup>, 2015. Accepted: July 10<sup>th</sup>, 2015.

## Abstract

This paper presents the study of the ground plane effect in passband filters using metamaterial cells in Open Split Ring Resonators (OSRR) structures on microstrip substrates. Three different configurations have been proposed, namely: by removing partially the ground plane of the OSRR cell back end, by windows design over the ground plane at the back end of each cell and by placing a full ground plane. The conducted analysis shows that the filter transmission response featuring a ground plane including windows proved to be the most flattened with the middle bandwidth of the three configurations. On the other hand, the performance of these filters is similar to a conventional filter based on three-pole microstrip technology but with a considerable reduction in size of about 60%.

Keywords: Meta-materials, flat filters, Split Ring Resonators (SRR), Open split ring resonator (OSRR).

## Estudio del efecto del plano de masa en filtros pasa banda usando celdas OSRR

### Resumen

En este artículo se presenta un estudio del efecto del plano de masa en filtros pasa banda mediante la utilización de celdas meta material en estructura de resonadores abiertos en anillo dividido OSRR (Open Split Ring Resonator) sobre sustratos microstrip. Se plantean tres tipos de configuraciones, a saber: eliminar parcialmente el plano de masa en la parte posterior a las celdas OSRR, diseñar ventanas sobre el plano de masa al respaldo de cada celda y colocar el plano de masa completo. El análisis llevado a cabo muestra que la respuesta de transmisión del filtro con ventanas en el plano de masa resulta ser la más plana de los tres casos y de igual manera con un ancho de banda intermedio. Por otra parte, el desempeño de este tipo de filtros es similar al de un filtro convencional en tecnología microstrip de tres polos, sin embargo su tamaño resulta ser un 60% más pequeño.

**Palabras clave:** Metamateriales, filtros planos, resonador de anillo dividido SRR, resonadores en anillo abierto dividido (OSRR).

### 1. Introducción

Las modernas aplicaciones en comunicaciones sobre las bandas de microondas y milimétricas como es el caso de antenas, filtros, líneas de transmisión, divisores de potencia entre otros requieren del diseño de soluciones de dispositivos y circuitos con reducido tamaño, alto desempeño y particularmente en el caso de los filtros se requiere que estos ofrezcan una reducción sustancial de las señales espurias al igual que las componentes armónicas no deseadas.

La implementación de estructuras periódicas (metamateriales) con tamaños comparables a la longitud

de onda de diseño, mediante las cuales se puede controlar el comportamiento electromagnético del material, ofrece una interesante alternativa de solución a estos requerimientos. Un ejemplo de esta solución son los medios zurdos (left-handed media) que se caracterizan por presentar un valor negativo de la permitividad dieléctrica y de la permeabilidad magnética efectivas, lo cual permite generar en el medio ondas de retroceso [1,2].

Si bien es cierto que la implementación física de metamateriales solo pudo ser posible en el siglo 21, desde el siglo pasado se idearon propuestas para estructuras capaces de modificar el comportamiento electromagnético

de los materiales [3], haciendo uso de esta propuesta, en [4] se presenta el diseño de una línea de transmisión sobre sustrato microstrip, la cual es cargada periódicamente con celdas cuadradas SRR, de igual manera en [5] se adelanta un estudio sobre estructuras CSRR (Complementary Split Ring Resonator) y SRR con geometría circular, acopladas a líneas de transmisión planas sobre sustratos microstrip, por otra parte, en [6] se presentan alternativas interesantes para la implementación de filtros en diversas configuraciones, todos ellos de tamaño reducido mediante el uso de celdas SRR (Split Ring Resonator), OSRR (Open Split Ring Resonator), CSRR, cuyo circuito equivalente puede ser representado por circuitos RLC en serie o paralelo junto con una línea de transmisión.

Así mismo en [7] se diseña un filtro rechaza banda con banda de rechazo de 2.25GHz de tamaño inferior a la longitud de onda, el cual hace uso de estructuras denominadas resonadores de anillos complementarios divididos, el filtro está compuesto por una celda OCSRR (Open Complementary Split Ring Resonator) básica y dos "stub" de longitud  $\lambda/4$  ubicados en direcciones opuestas para reducir su tamaño. El ancho de banda de rechazo se incrementó en un 59.11% y su tamaño fue reducido en un 15% respecto a un filtro convencional.

En [8] se propone el diseño de un filtro rechaza banda angosto (Notch) el cual se construye mediante la interconexión de dos anillos abiertos divididos (OISRR). El circuito equivalente para la estructura resultante es la de un circuito resonante LC paralelo, permitiendo su conexión en paralelo con la línea de transmisión. Esta celda presenta una frecuencia de resonancia que resulta ser la mitad de la de una celda del tipo resonador en anillo dividido (SRR), lo cual permite que su tamaño eléctrico sea pequeño. Los resultados de medida sobre el prototipo construido arrojan un ancho de banda de rechazo a -3dB

inferior al 2%, con pérdidas de inserción superiores al 10dB en la banda de rechazo, esto para las dos frecuencias de anti-resonancia que resultan de la configuración.

En [9] se propone el diseño de un filtro pasa banda mediante dos líneas de transmisión microstrip paralelas ubicadas en las dos caras del sustrato DSPSL (Double-Sided Parallel-Strip Line) formando una geometría básica del tipo celda (SRR), mediante las cuales se logra pasar de un comportamiento como líneas de transmisión paralelas DSPSL a una celda básica SRR (Split Ring Resonator), de tal manera que su comportamiento electromagnético se torna eléctrico

Este resultado se logra interrumpiendo el centro de las dos líneas de transmisión paralelas en forma de anillo y adicionando dos postes que unen el lado superior con el lado inferior y viceversa logrando de esta manera que el circuito final se comporte como una celda del tipo CSRR (Complementary Split Ring Resonator) con la cual se diseña un filtro pasa banda centrado en 3.3GHz.

En este trabajo se estudiará el efecto de la geometría del plano de masa en el comportamiento de este tipo de filtros para lo cual se plantean tres tipos de configuraciones sobre un filtro de 3 polos con celdas OSRR a saber: eliminar parte del plano de masa, particularmente en la parte posterior a las celdas OSRR, diseñar ventanas sobre el plano de masa al respaldo de cada celda y colocar el plano de masa completo.

## 2. Resonadores abiertos en anillo dividido (OSRR)

La Fig. 1 a) muestra la cara superior de una celda básica OSRR y las Fig. 1b) a 1d) muestran la cara posterior (plano de masa) de las tres configuraciones analizadas en este documento a saber: plano de masa parcial, plano de masa completo y ventanas en el plano de masa respectivamente.

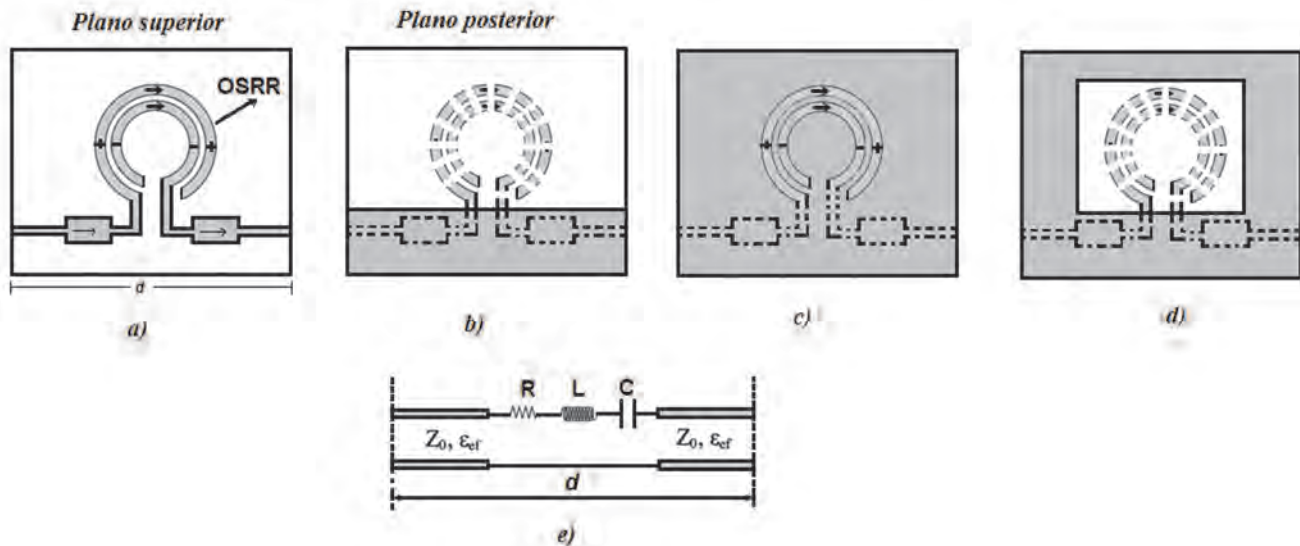


Figura 1. Celda OSRR: a) Vista capa superior b) Vista capa posterior con plano de masa parcial c) Vista posterior con plano de masa completo d) Vista posterior con ventana en plano de masa e) Circuito RLC Equivalente.

Fuente: Los autores.

En las celdas OSRR (Split Ring Resonator) mostrada en la Fig. 1, uno de los anillos es atravesado por un flujo de corriente alimentado por la línea de transmisión principal mientras que el otro anillo es excitado por una corriente de desplazamiento a través de la separación entre los anillos. El modelo de circuito es similar al de una celda SRR sin embargo se añade en serie la línea de transmisión como se muestra en la Fig. 1(e).

El ancho de banda del filtro puede ser controlado mediante las secciones de línea de transmisión que unen las celdas OSRR (longitud  $d$  en las Fig. 1(a) y (e), mientras que la profundidad en la banda de rechazo depende del número de celdas utilizadas en la implementación del filtro. La capacitancia equivalente resultante de esta configuración es cuatro veces más grande que la de una celda SRR y su frecuencia de resonancia se puede determinar con la expresión dada en (1).

$$f_0 = 1/(2\pi\sqrt{L_S C_S}) \quad (1)$$

Donde  $L_S$  y  $C_S$  representan la capacitancia e inductancia equivalentes de la estructura SRR. La expresión para  $C_S$  se determina en [10] y la inductancia  $L_S$  puede ser calculada aproximadamente como la de un anillo simple con radio promedio  $r_0$  y ancho  $c$  como se aprecia en la Fig. 2 y su valor se expresa en [11] mediante (2):

$$\frac{L}{\mu_0} = \frac{\pi^3}{4c^2} \int_0^\infty \frac{1}{k^2} [bB(kb) - aB(ka)]^2 dk \quad (2)$$

En (2) las constantes que intervienen de determinan como:  $a = r_0 - c/2$  y  $b = r_0 + c/2$  y  $B$  es definida como  $B(x) = S_0(x)J_1(x) - S_1(x)J_0(x)$ , donde  $S_n$  y  $J_n$  son las funciones de Struve y Bessel de orden  $n$ . La nueva capacitancia de una estructura OSRR se puede obtener mediante la expresión (3):

$$C = 2\pi r_0 C_{pul} \quad (3)$$

Donde  $r_0$  es el radio medio del anillo (Fig. 2) y  $C_{pul}$  es la capacitancia por unidad de longitud, la cual es calculada mediante la expresión (4):

$$C_{pul} = \beta/\omega Z_0 \quad (4)$$

La ecuación (4) determina el valor de  $C_s$  en (1). Donde  $\beta$  es la constante de fase,  $\omega$  la frecuencia angular y  $Z_0$  la impedancia característica de la línea ( $Z_0=50\Omega$ ),  $\epsilon_r = 3.5$  y  $R = 0$  en la Fig. 1(e). Los resultados anteriores se basan en suponer una línea de transmisión sin pérdidas [11].

### 3. Estudio del efecto del plano de masa en filtros pasa banda usando celdas OSRR

En esta sección se analiza el comportamiento de un filtro implementado con tres celdas compuestas por estructuras de resonadores abiertos en anillo dividido (OSRR) en las cuales se cambia la geometría del plano de masa, para lo cual se diseña inicialmente la celda básica como se muestra a continuación.

El diseño de la celda básica se lleva a cabo mediante las ec. (1)-(4) y las ecuaciones de diseño para  $C_s$  suministradas en [10],

mediante las cuales es posible obtener una frecuencia de resonancia para el anillo de  $f_0 = 3.42GHz$  con los valores para la inductancia y capacitancia dados por  $L_s = 7.58nH$  y  $C = 0.284pF$ , para lo cual se requiere diseñar el anillo con las siguientes dimensiones:  $c = 0.2mm$ ,  $s = 0.3mm$ ,  $r_{ext} = 2.0mm$  (Fig. 2).

Tomando como base las anteriores dimensiones para el anillo básico se construye un filtro compuesto por tres anillos en el cual se estudiará el efecto de la geometría en el plano de masa en los tres casos siguientes: una primera geometría en la que se diseña un plano de masa que ocupa la parte inferior del filtro dejando libre la parte posterior de las celdas, Fig. 1(b). Una segunda geometría que hace uso de un plano de masa completo, Fig. 1(c). Finalmente, los resultados de las anteriores propuestas se comparan con los obtenidos mediante una geometría que hace uso de ventanas construidas en el plano de masa, las cuales dejan libre las celdas, Fig. 1(d).

Los tres filtros se implementarán sobre un sustrato con las siguientes especificaciones: constante dieléctrica  $\epsilon_r = 3.5$ , tangente de pérdidas  $tg \delta = 0.0018$ , espesor del sustrato  $h = 1.524mm$  y espesor del cobre  $t = 17.5\mu m$ . La impedancia característica de la línea de transmisión principal es cercana a  $Z_0=50\Omega$ , parámetro que se ajusta cambiando el ancho y largo de las líneas que unen las celdas ( $LTX1$ ,  $LTX3$  en la Fig. 3).

El comportamiento de este filtro es similar al de un filtro de tres polos realizado con los métodos tradicionales, sin embargo, como se notará posteriormente, el tamaño requerido con metamateriales resulta ser menor respecto a los métodos tradicionales de filtros sobre sustratos microstrip.

#### 3.1. Filtro OSRR con plano de masa parcial.

La Fig. 3 muestra la geometría de un filtro compuesto por tres celdas básicas OSRR (Fig. 2), en el cual se diseña un plano de masa que deja libre la parte superior de las celdas OSRR.

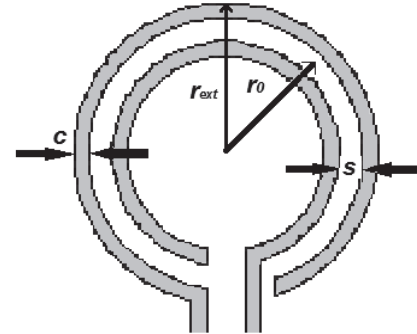


Figura 2. Celda OSRR básica.  
Fuente: Los autores

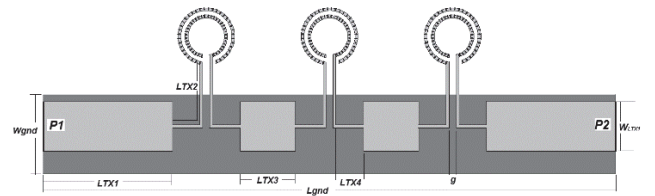


Figura 3. Filtro pasa banda con celdas OSRR, con plano de masa hasta la mitad del filtro.  
Fuente: Los autores

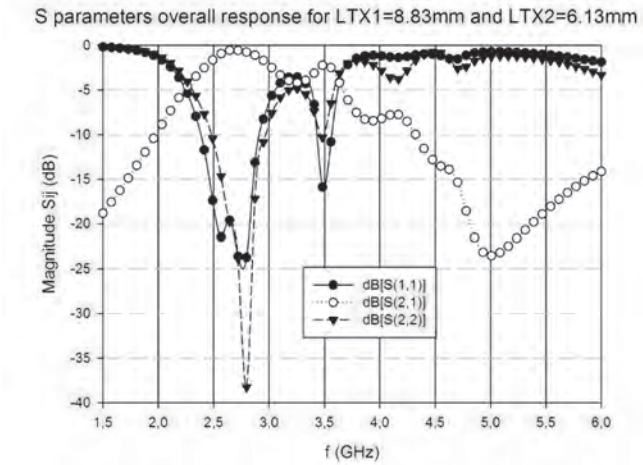


Figura 4. Resultados de las Simulaciones para la magnitud de los parámetros S11, S21 y S22.

Fuente: Los autores

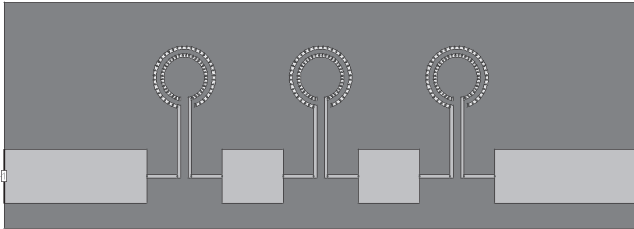


Figura 5. Filtro pasa banda con celdas OSRR y plano de masa completo.

Fuente: Los autores

La Fig. 4 muestra los resultados de las simulaciones para la magnitud de los parámetros de adaptación S11 y S22 y el parámetro de transmisión S21 para los puertos 1 y 2 en un filtro que elimina la parte superior del plano de masa. Las dimensiones de este filtro son:  $LTX1 = 8.83\text{mm}$ ,  $LTX2 = 6.13\text{mm}$ ,  $LTX3 = 3.87\text{mm}$ ,  $LTX4 = 1.94\text{mm}$ ,  $WLTX1 = 3.43\text{mm}$ ,  $W_{gnd} = 5.48\text{mm}$ ,  $L_{gnd} = 40.22\text{mm}$ ,  $g = 0.5\text{mm}$  (Fig. 3). Este filtro fue fabricado y caracterizado y sus resultados se muestran en sección posterior.

### 3.2. Filtro OSRR con plano de masa completo

La Fig. 5 muestra el diseño de un filtro compuesto por tres celdas OSRR con las mismas dimensiones del filtro mostrado en la Fig. 3 pero diseñando un plano de masa completo cubriendo de esta manera la totalidad del respaldo de las celdas.

La Fig. 6 muestra los resultados de las simulaciones para la magnitud de los parámetros de adaptación S11 y S22 y los parámetros de transmisión S12 y S22 para los puertos 1 y 2 en un filtro con tres celdas OSRR y un plano de masa completo, con las mismas dimensiones descritas para el filtro descrito en la sección 3.1.

### 3.3. Filtro con celdas OSRR y ventanas en el plano de masa

La Fig. 7 muestra el diseño de un filtro compuesto por tres celdas básicas OSRR, el cual hace uso de las ventanas en

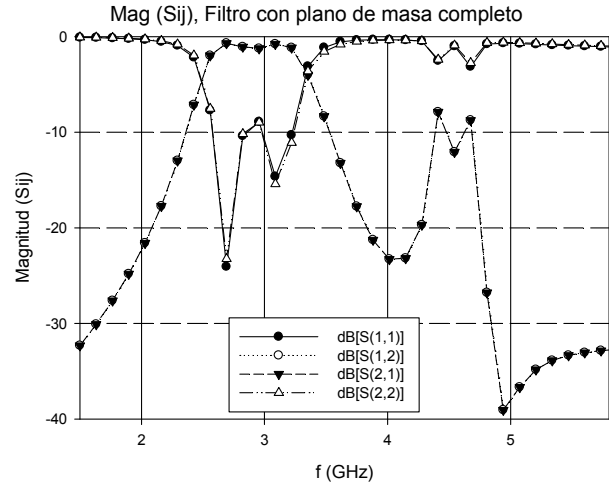


Figura 6. Resultados de las Simulaciones para la magnitud de los parámetros S11, S21, S12 y S22 para filtro OSRR con plano de masa completo.

Fuente: Los autores

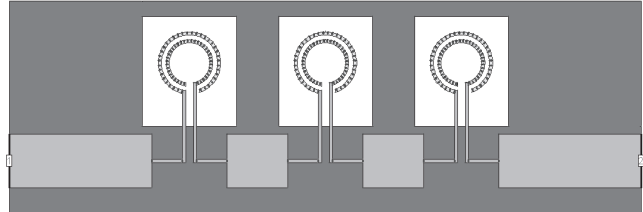


Figura 7. Filtro pasa banda con celdas OSRR y ventanas en el plano de masa.

Fuente: Los autores

el plano de masa. Las dimensiones de las ventanas en el plano de masa son de 6mm de largo por 7mm de alto, este parámetro influye particularmente en el ancho de banda de los parámetros de transmisión S12, S21 y de igual manera permite aplanar esta curva.

La Fig. 8 muestra los resultados de las simulaciones para la magnitud de los parámetros de adaptación S11 y S22 y los parámetros de transmisión S12 y S22 para los puertos 1 y 2 en un filtro que incluye las ventanas en el plano de masa (Fig. 7).

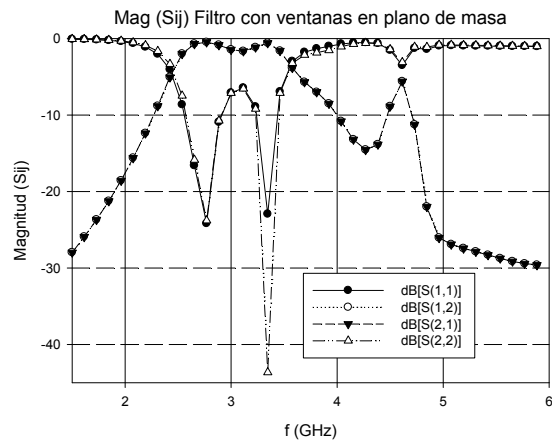


Figura 8. Resultados de las simulaciones para la magnitud de S11, S21, S12 y S22 para filtro que incluye ventanas en el plano de masa.

Fuente: Los autores

La Fig. 9 muestra los resultados totales de las simulaciones para los parámetros de adaptación S11 y S22 en los tres casos estudiados separadamente en las secciones 3.1 a 3.3, de igual manera la Fig. 10 muestra los resultados de las simulaciones del parámetro de transmisión S21 en los mismos tres casos anteriores. El parámetro S12 muestra resultados bastante similares al parámetro S21 en los tres casos estudiados de tal manera que no se grafica.

De la Fig. 10 se aprecia que el filtro sin ventanas permite desplazar la frecuencia de resonancia a frecuencias inferiores de 2.5GHz controlando la longitud de los tramos de línea de transmisión denominados LTX2 en la Fig. 2, sin embargo se genera una pequeña diferencia en la respuesta de los dos puertos (S11 contra S22).

Esta diferencia en los parámetros de transmisión del filtro se explica por el efecto inductivo que introduce la longitud de la línea de transmisión. Asimismo, la ausencia de las ventanas permite reducir el tamaño del filtro al permitir acercar las celdas.

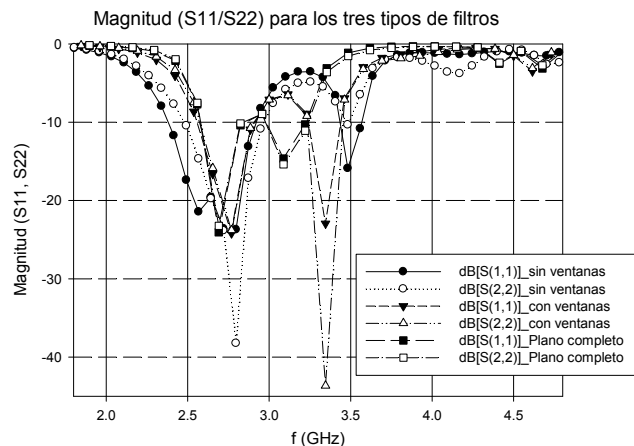


Figura 9. Resultados de las simulaciones para la magnitud de S11 y S22 para los tres casos estudiados.

Fuente: Los autores

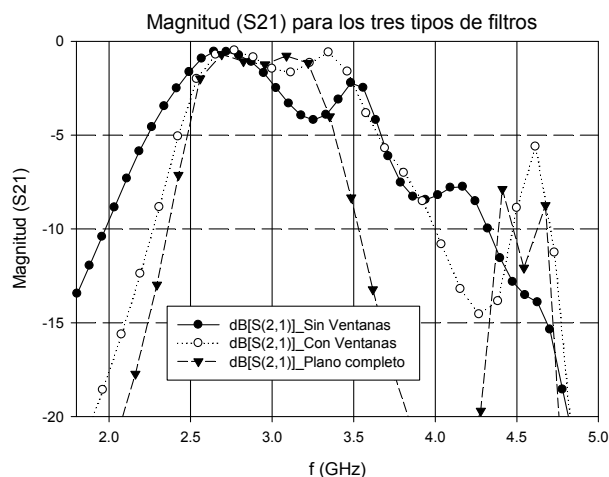


Figura 10. Resultados de las simulaciones para la magnitud de S21 para los tres casos estudiados.

Fuente: Los autores

Por otra parte, en la Fig. 10 se aprecia que la respuesta de transmisión del filtro S21 con plano de masa que incluye ventanas resulta ser la más plana de los tres casos y de igual manera la de ancho de banda intermedio. Asimismo, controlando las dimensiones de las ventanas se logra modificar el ancho de banda de este filtro (este estudio paramétrico no se incluye en este trabajo). De esta misma figura se nota que la respuesta menos plana es la obtenida con el filtro con plano de masa intermedio hasta aproximadamente la mitad del filtro. Finalmente, el diseño de este tipo de filtros puede ser llevado a cabo mediante métodos de optimización multiobjetivo [12].

#### 4. Resultados experimentales y análisis

Una vez las tres geometrías fueron analizadas y optimizadas mediante simulaciones, se procede a la construcción de los prototipos y a su respectiva caracterización, mostrando resultados muy cercanos entre los valores medidos frente a los simulados como a continuación se detalla.

La Fig. 11 muestra la fotografía de la cara superior del filtro con plano de masa parcial. Esta foto presenta en cada caso algunos cambios imperceptibles (a la vista) en el diseño de las celdas para compensar el efecto del plano de masa usado, teniendo en cuenta que se buscó que las frecuencias de resonancia en los tres casos fueran similares.

La Fig. 12 muestra las fotografías de las caras posteriores de los tres filtros estudiados (planos de masa), incluyendo los conectores.

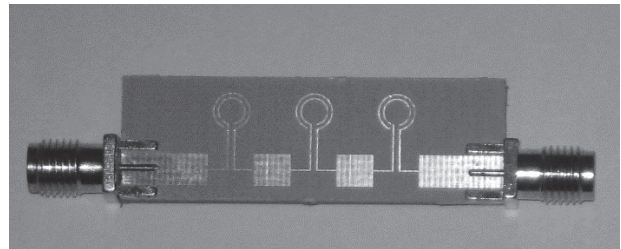


Figura 11. Fotografía de cara superior del filtro

Fuente: Los autores

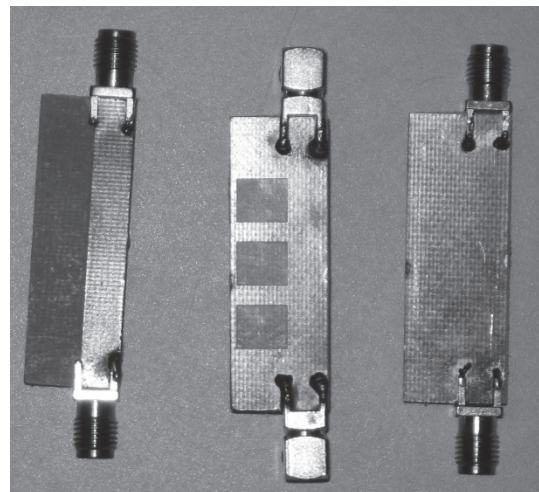


Figura 12. Fotografías de las tres caras posteriores de los filtros.

Fuente: Los autores

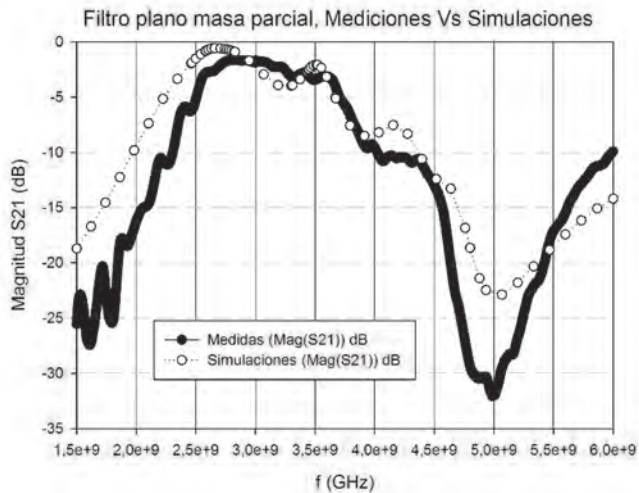


Figura 13. Simulaciones y medidas magnitud S21 del filtro con plano de masa parcial.

Fuente: Los autores

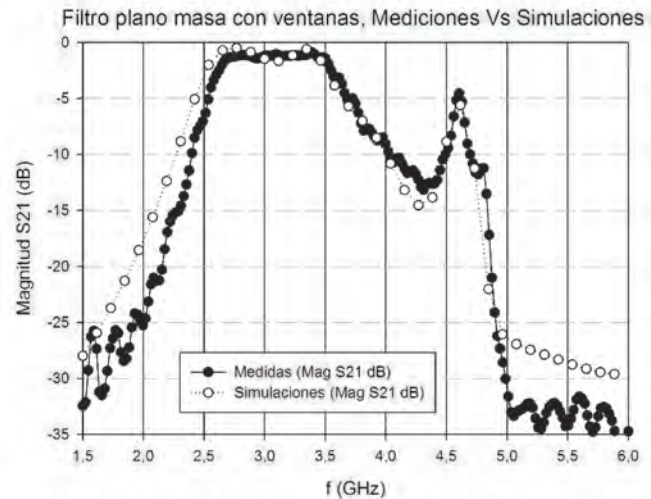


Figura 15. Simulaciones y medidas magnitud S21 del filtro con plano de masa con ventanas.

Fuente: Los autores

La Fig. 13 muestra los resultados de las medidas comparadas con las simulaciones del parámetro S21 para el filtro con plano de masa parcial.

La Fig. 14 muestra los resultados de las medidas comparadas con las simulaciones del parámetro S21 para el filtro con plano de masa completo. En este mismo sentido, en la Fig. 15 se muestran los resultados de las medidas comparadas con las simulaciones del parámetro S21 para el filtro con plano de masa que incluye ventanas. Comparando los resultados de los tres filtros se nota que: el filtro con ventanas presenta la respuesta más plana de las tres con un ancho de banda intermedio, así mismo, el filtro con plano de masa parcial presenta la respuesta menos plana con el mayor ancho de banda, por último, el filtro con plano de masa completo presenta una respuesta plana bastante aceptable con el mínimo ancho de banda de los tres.

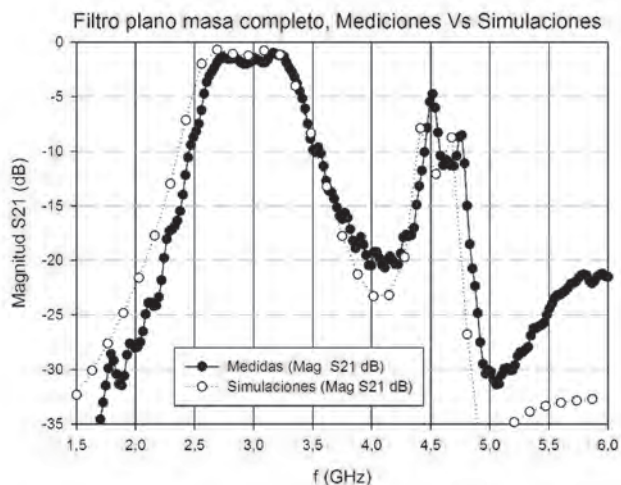


Figura 14. Simulaciones y medidas magnitud S21 del filtro con plano de masa completo

Fuente: Los autores

## 5. Conclusiones

Se ha llevado a cabo un estudio sobre el efecto del plano de masa en un filtro pasa banda compuesto por tres celdas OSRR con los siguientes resultados: las respuestas de transmisión (S21 y S12) de los tres filtros son similares en cada caso, por otra parte, la respuesta (S21) del filtro con plano de masa completo resulta ser plana y con el menor ancho de banda. El filtro con plano de masa parcial permite desplazar la frecuencia de resonancia a frecuencias inferiores respecto a las otras dos versiones controlando la longitud de los tramos de línea de transmisión denominados *LTX2* en la Fig. 2, sin embargo se genera una pequeña diferencia en la respuesta de los dos puertos (*S11* contra *S22*), así mismo, la respuesta de transmisión es la menos plana de los tres casos y con el ancho de banda mayor. La respuesta del filtro con ventanas en el plano de masa resulta ser la más plana de los tres y con un ancho de banda intermedio.

Este comportamiento de la respuesta de los filtros frente al plano de masa ofrece un grado de libertad adicional en el diseño de los mismos, aspecto importante a la hora de encontrar la solución a un problema específico. Finalmente, los resultados de las medidas frente a las simulaciones resultan ser muy cercanas en los tres casos. Por otra parte, el desempeño de este tipo de filtros es similar al de un filtro convencional en tecnología microstrip de tres polos, sin embargo su tamaño resulta ser un 60% más pequeño.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a los profesores Francisco Medina y Juan Baena por su invaluable aporte en la discusión de los resultados y suministro de información de gran importancia para el desarrollo de este trabajo. Así mismo agradecen al grupo GRE de la Universidad Politécnica de Valencia por permitir el uso del software de simulación y el de graficado.

## Referencias

- [1] Veselago, V.G., The Electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$ , Sov. Phys. USPEKHI, 10 (4), pp. 509-517, 1968.
- [2] Veselago, V., Braginsky, L., Shklover, V. and Hafner, C., Negative refractive index materials, Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 3, pp. 1-30, 2006.
- [3] Pendry, J.B., Holden, A.J., Robbins D.J., and Stewart, W.J., Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 47 (11), pp. 2075-2084, 1999. <http://dx.doi.org/10.1109/22.798002>.
- [4] Bonache, J., Metamaterials in microstrip technology for filter applications, antennas and propagation Society International Symposium, 2005 IEEE, 1A (1), pp. 668-671, 2005. DOI: 10.1109/APS.2005.1551409.
- [5] Baena, J.D., et al., Equivalent-Circuit models for split-ring resonators and complementary split-ring resonators coupled to planar transmission lines, IEEE Transactions on microwave theory and techniques, 53 (4), pp. 1451-1461, 2005. DOI: 10.1109/TMTT.2005.845211.
- [6] Albacete, J.B., PhD. dissertation, Dept. Electrónica, Universidad Autónoma de Barcelona, Bellaterra, Spain, 2006.
- [7] Phani-Kumar, K.V., Karthikeyan, S.S., A compact and high performance band-stop filter using open complementary split ring resonator, National Conference on Communications (NCC), 15-17 Feb. pp. 1-5, 2013. DOI: 10.1109/NCC.2013.6487966.
- [8] Ruiz, J., Hinojosa, J. and Alvarez-Melcon A., Microstrip notch filters based on open interconnected split ring resonators (OISRRs), Applied Physics A, 112 (2), pp. 263-267, 2013.
- [9] Wang, L., Qi-Lin, X., Yong-Fan, F. and Bo-Zhu, Z., Electric split-ring resonator based on double-sided parallel-strip line, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 12, pp. 69-71, 2013. DOI: 10.1109/LAWP.2013.2238598.
- [10] Bahl, I. and Bhartia, P., Microwave solid state circuit design. New York: Wiley, 1988.
- [11] Marquez, R., Mesa, F., Martel, J. and Medina, F., Comparative analysis of edge and broadside coupled split ring resonators for metamaterial design theory and experiments, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 51 (10), pp. 2572-2581, 2003. DOI: 10.1109/TAP.2003.817562.
- [12] Santos-Azebedo, M., et al., Multiobjective optimization of the reactive power compensation in electric distribution systems, DYNA, 81 (187), pp. 175-183, 2014. DOI: 10.15446/dyna.v81n187.40979.

**I. Díaz-Pardo**, es Ing. Electrónico por la Universidad Distrital. En el año 2010 inicia sus estudios de Maestría, para lo cual se integra como investigador adscrito al grupo Laboratorio de Ingeniería de Microondas Electromagnetismo y Radiación (LIMER) de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. En el 2014 obtiene el título de Magister en Ciencias de la Información y las Comunicaciones. Actualmente ocupa el cargo de Profesor de cátedra en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.

**C.A. Suárez-Fajardo**, es Ing. Electrónico por la Universidad Distrital y Licenciado en matemáticas por la Universidad Pedagógica Nacional, Bogotá, Colombia. Inicia sus estudios doctorales en 2002, para lo cual se integra como investigador adscrito al grupo de radiación electromagnética (GRE) de la Universidad Politécnica de Valencia, España. En el 2003 obtiene el título de especialista en Telecomunicaciones, en el 2004 obtiene el título de MSc. en Telecomunicaciones y el de Dr. en Telecomunicaciones en 2006 por la Universidad Politécnica de Valencia, España. Actualmente ocupa el cargo de Profesor Titular en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Es autor de más de 40 artículos en revistas indexadas y en congresos internacionales. Es par evaluador de proyectos de Colciencias y de revistas tales como: Revista Ingeniería de la Universidad de Antioquia, Revista Ingeniería de la Universidad Javeriana, Revista Ingeniería y Desarrollo de la Universidad del Norte, revista Chilena de Ingeniería (Ingeniare) y Journal of Antennas and Propagation (IJAP).

**G.A. Puerto-Leguizamón**, es Ing. de Telecomunicaciones. En 2003 se vinculó al Grupo de Comunicaciones Ópticas y Cuánticas de la Universidad Politécnica de Valencia, España. Dr. en Telecomunicaciones en 2008 e investigador posdoctoral en el Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia de la misma universidad hasta 2011. Desde 2012 es Profesor Asistente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. A la fecha ha publicado más de 40 artículos en revistas y congresos internacionales en el campo de redes ópticas, es par evaluador de Colciencias y de las revistas IEEE Journal on Lightwave Technologies, IEEE Photonic Technology Letters y Optics Express. Sus intereses de investigación incluyen sistemas de radio sobre fibra, networking óptico y redes de acceso ópticas.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN  
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería  
Eléctrica e Ingeniería de Control

Oferta de Posgrados

Maestría en Ingeniería - Ingeniería Eléctrica

Mayor información:

E-mail: [ingelcontro\\_med@unal.edu.co](mailto:ingelcontro_med@unal.edu.co)  
Teléfono: (57-4) 425 52 64

# Methodological design for the prevention of risk in production processes

Alexander De Jesús Pulido-Rojano <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Industrial Engineering Program, Universidad Simón Bolívar, Barranquilla, Colombia. [apulido3@unisimonbolivar.edu.co](mailto:apulido3@unisimonbolivar.edu.co)

Received: April 2<sup>nd</sup>, 2014. Received in revised form: February 23<sup>th</sup>, 2015. Accepted: July 11<sup>th</sup>, 2015.

## Abstract

This paper proposes a methodological design based on the development, creation, adaptation and implementation of some analysis tools and the deployment of the risk management process content in standard ISO 31000. This allows for the design of a monitoring and quality control system of critical variables associated with equipment and operating conditions for the purpose of identifying and mitigating sources diversions product specifications. It also seeks to harmonize work philosophies with international management standards. The validation was performed by an industrial company from the city of Barranquilla. The content of this paper provides professionals and industry with a way to address and improve the capacity of any type of manufacturing process in any organization through standardized steps.

**Keywords:** Statistical process control; risk management process; risk assessment; critical variables; analysis tools.

# Diseño metodológico para la prevención de riesgos en procesos de producción

## Resumen

La presente investigación propone un diseño metodológico fundamentado en el desarrollo, creación, adaptación e implementación de algunas herramientas de análisis y en el despliegue del proceso de gestión de riesgo contenido en la norma ISO 31000, permitiendo diseñar un sistema de monitoreo y control de calidad de variables críticas asociadas con condiciones de operación de equipos, para identificar y mitigar en línea potenciales fuentes de desviación de especificaciones de producto, armonizando filosofías de trabajo con normas internacionales de gestión y cuya validación se realizó en una empresa del sector industrial de la ciudad de Barranquilla. El contenido de este artículo ofrece a los profesionales e industriales una forma de abordar y mejorar cualquier tipo de proceso de fabricación en cualquier tipo de organización por medio de pasos estandarizados.

**Palabras clave:** Control estadístico de procesos; Proceso de gestión de riesgos; Evaluación del riesgo; variables críticas; herramientas de análisis.

## 1. Introduction

Organizations' concern to offer the best product or service requires the use of a large number of statistical tools and standards to achieve optimum quality, to meet needs and largely fulfill the expectations of its customers or users [1].

The statistical and quality tools have been widely used to assist the operation of production systems and compliance with products and services' specification requirements [2-9]. They are implemented by organizations to demonstrate their commitment and orientation to continuous improvement

[10]. Moreover, risk management has been vital in the financial [11,12], the Project Management [13-16], the Health and Safety [17] and the information technology sectors [18].

Problems arise when it is necessary to combine statistical techniques with management rules for compliance with national and international standards.

Given that, until now, there is little evidence of the implementation of a risk-based approach in production systems. In this paper we present a methodological design that enables the integration of some statistical and quality

tools with the deployment of the risk management process contained in ISO 31000. It has been designed to become a useful tool for the detection and mitigation of defects in lines of production and the identification of potential sources of non-conformities, as well as harmonizing working philosophies with national and international standards of management. The methodological design has been implemented for industrial production, more precisely, in a company in the industrial sector in Barranquilla-Colombia that is dedicated to transformation of glass and aluminum.

This article is organized as follows. Section 2 describes our methodology and its constituent parts. The computational results are presented in Section 3 and show the effectiveness of our method and final remarks are made in Section 4.

## 2. Methodological design

The proposed methodological design has been established as a simple process that summarizes the steps to be followed in order for it to be implemented in any production process. The steps begin with the identification and description of products and processes to be monitored and then the proposed actions to mitigate undesired deviations, risks and non-conformities identified in the manufacturing process are reviewed and monitored (Fig. 1).

Also, seeking to provide guidance and clarity the following section describes each of the steps:

- **Identification and description:** In this first step, processes and products which will be monitored are identified, a detailed description of the production stages, activities, working methods and resources used is presented. This seeks to find possible failings or deviations, risks and causes of nonconformity.
- **Implementation and Classification:** In this step, the implementing of the statistical and quality tools is classified using the cause-effect diagram, as well as the causes of nonconformities, deviations or risks identified in each process identified for monitoring. Additionally, instruments for monitoring and statistical process control are implemented by means of control charts, and finally, using the Pareto chart, occurrences of deviations or non-conformances are identified. The tools implemented at this stage will depend on the type of process that is being analyzed.

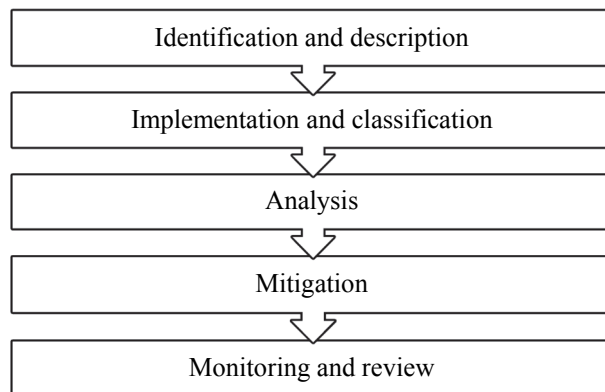


Figure 1. Steps to implement the methodological design.  
Source: The authors.

- **Analysis:** At this stage a statistical analysis of processes and data analysis of the occurrence of nonconformities based on the results obtained in the implementation stage and classification is performed.
- **Mitigation:** In order to reduce risks, deviations and non-conformities detected in the production process and the deployment of the risk management process is proposed according to ISO 31000. Also, containment actions, reaction actions and prevention actions will be implemented to mitigate the occurrence of nonconformities are identified.
- **Monitoring and review:** Being a process of continuous improvement, monitoring and reviewing of the effectiveness of the proposed actions is performed. At this stage, new actions are recommended in case the actions first suggested have not been effective, or if updating the system in the step of identifying of new risks is desired.

## 3. Results and analysis

To validate the proposed methodological design that was described in the previous section, a company founded in Barranquilla, Colombia was identified that is dedicated to the manufacture and processing of glass and aluminum. We focus on the study and analysis of the glass production line, which consists of eight threads of transformation: cutting, polishing rectilinear, Polishing Curved, Pierced, washing and drying, design, Sandblasting and Tempered. The Flowchart Glass Production is shown in Fig. 2. For the purpose of showing the development of the methodological design its application in the Cutting process will be presented. There are similar results in the remaining processes.

### 3.1. Identification and description

Operations and tools used in the cutting process, particular aspects that may be relevant in the operation, the sequential steps in the processing activity of the glass and the identification and analysis of causes of nonconformities, deviations or related risks were identified.

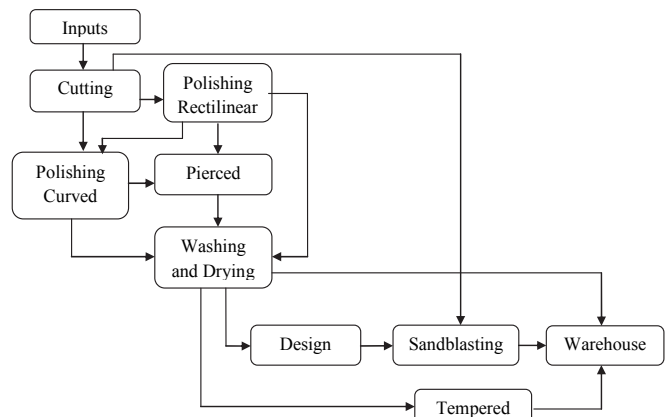


Figure 2. The Flowchart Glass Production. Source: own authorship  
Source: The authors.

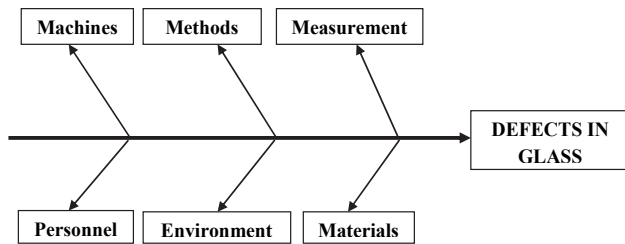


Figure 3. Cause-effect Diagram to Glass.

Source: Adapted from [19]

### 3.2. Implementation and classification

Table 1.

Causes of defects in glass

| Sources     | Causes                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Personnel   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- During the transfer to the buffer, the glass may break partially or completely if there is a lack of coordination among operators.</li> <li>- When removing the raw glass of the crate that protects it, may suffer bumps that can partially or completely break the module.</li> <li>- Failures may occur in the dimensions of the glass cut by poor fit of the measurement rule.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Methods     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- On making the cut without lubricant, flaws can occur in the dimensions of the foil because when picking excess generated by the court, workers cannot follow the cut line and the separation extends in another direction causing damage to the glass.</li> <li>- The glass may suffer scratches due to the presence of glass shavings adhered to the cutting table by precuts.</li> <li>- For circular surfaces, not properly remove the excess glass, the court may deviate from the default line.</li> <li>- Scratches can occur due to inappropriate handling of the glass.</li> <li>- If the operator does not adequately remove small excesses of the cut edge, it can cause a defect of hoarfrost.</li> </ul> |
| Machines    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- The poor condition of the cutting tools can cause a bad cut which in turn is causing errors in dimensions.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Materials   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- The glass that arrive from the warehouse of supplies would be spotting inside.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Measurement | <ul style="list-style-type: none"> <li>- A wrong measurement on the sheet of glass to be cut can cause failures in the final dimensions of the sheet.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Environment | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Weather conditions and the characteristics of the warehouse caused the ingress of moisture which in turn causes spots on glasses temporarily stored.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |

Source: Adapted from [19]

In this second stage, by using the cause-effect diagram the classifying of origin of some of the deviations is achieved, and the risks and non-conformities are identified at the stage of identification and description. Some are shown in Fig. 3 and Table 1.

To determine the frequency of occurrence of defects in glass in the cutting process, (scratches, breaks, inadequate cuts and others) (See Figs. 4-6), the Pareto diagram is implemented, which looks to prioritize and recognize if the process is critical in the production line. The Pareto diagram is shown in Fig.5.



Figure 4. Hoarfrost

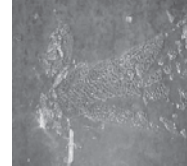


Figure 5. Break



Figure 6. Cuts inadequate

Source: The authors

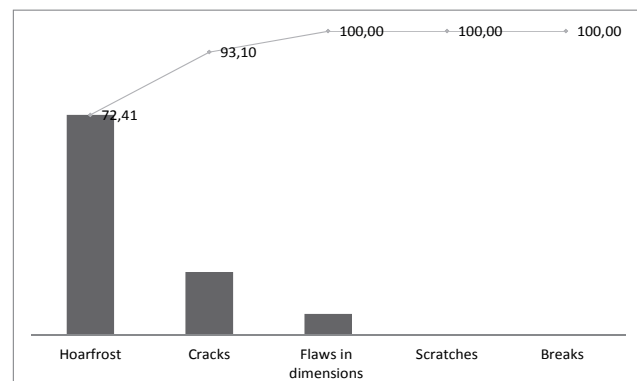


Figure 5. Pareto diagram for the cutting process

Source: The authors

Table 2.

Cutting process samples

| Samples | Defects | Samples | Defects |
|---------|---------|---------|---------|
| 1       | 3       | 21      | 4       |
| 2       | 1       | 22      | 6       |
| 3       | 1       | 23      | 5       |
| 4       | 5       | 24      | 3       |
| 5       | 3       | 25      | 0       |
| 6       | 0       | 26      | 1       |
| 7       | 5       | 27      | 3       |
| 8       | 0       | 28      | 2       |
| 9       | 5       | 29      | 0       |
| 10      | 3       | 30      | 5       |
| 11      | 1       | 31      | 4       |
| 12      | 2       | 32      | 4       |
| 13      | 0       | 33      | 0       |
| 14      | 3       | 34      | 3       |
| 15      | 0       | 35      | 3       |
| 16      | 1       | 36      | 2       |
| 17      | 1       | 37      | 0       |
| 18      | 0       | 38      | 4       |
| 19      | 1       | 39      | 2       |
| 20      | 0       | 40      | 2       |

Source: The authors

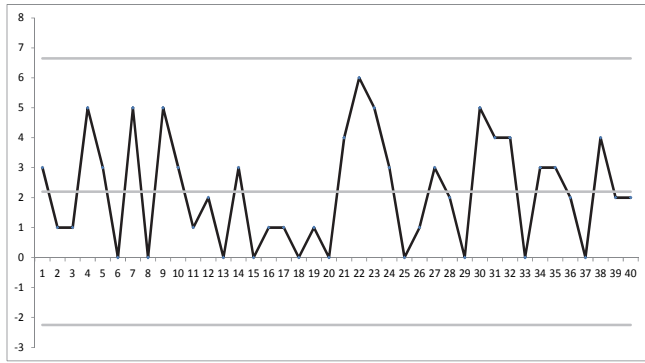


Figure 6. Control Chart "C" Cutting process  
Source: The authors

Also, as a tool for monitoring and following up all processes in the manufacture of glass, chart "c" is used. This is because the behavior is analyzed for the occurrence of defects in a product unit, which is represented by a sheet of glass. To calculate the control limits, forty product samples were taken in each process and the defects found in each sample, caused by identified sources, were quantified. To determine the sample size Montgomery's [19] theory was used, which suggests that the sample size should provide a 50% probability of detecting a shift in the process. Evidence for this application is shown in Fig.6. Defects for 40 samples taken randomly from the cutting process are presented in Table 2.

After the processing of the data, the value of the lower, central and upper limits of the process were:

$$LCL = \bar{c} - 3\sqrt{\bar{c}} = -2.24 \quad (1)$$

$$CL = \bar{c} = 2.17 \quad (2)$$

$$UCL = \bar{c} + 3\sqrt{\bar{c}} = 6.59 \quad (3)$$

### 3.3. Analysis

The analysis was performed taking into account the classification of nonconformities by the cause-effect diagram. The analysis of the incidence of defects was prioritized through the Pareto and statistical control charts.

It is noted that in the process of cutting that about 93% of nonconformities correspond to Hoarfrost and Cracks, often caused by personnel and the methods used in the process. Furthermore, it is evident that the maximum number of defects per unit of product is 6.59 with a mean of 2.17. For this case, the lower control limit is negative so it is replaced with zero, since there can be no adverse effects in the glass.

### 3.4. Mitigation

This phase is performed under the general approach of the risk management process included in ISO 31000:2009, and it also takes into consideration the treatment and management of risk on causes of deviations or non-conformances identified in phase of identification and description.

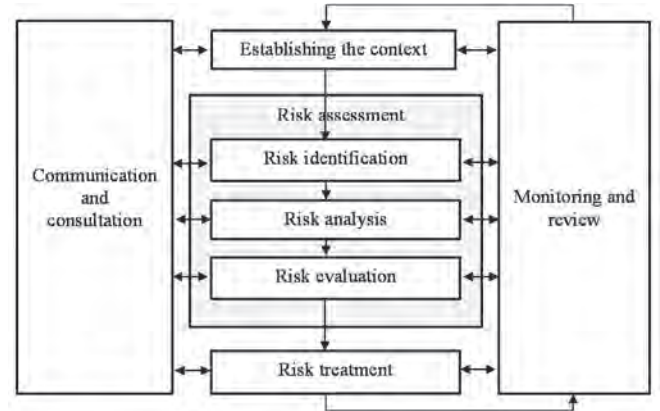


Figure 7. Risk management process - ISO 31000.  
Source: [21, 22]

Table 3.  
Matrix of Criteria and Consequences

|   |                  | RISK CRITERIA                               |                                                 |                                                                          |
|---|------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
|   |                  | QUALITY                                     | COST                                            | TIME                                                                     |
| 5 | CATASTROP<br>HIC | Critical defects, unusable products         | Loss of 100% of the product cost                | 5 or more weeks of delays in production or delivery times                |
|   |                  | Major defects. Unacceptable to the customer | Increase of unit cost to 20-40% by reprocessing | Delays of 2 to 5 weeks are presented in the production or delivery times |
|   |                  | Major defects. It requires reprocessing     | Increase of unit cost to 10-15% by reprocessing | Delays of 1 to 2 weeks are presented in the production or delivery times |
| 2 | LESSER           | Minor defects                               | Increase of unit cost to 5% by reprocessing     | Insignificant delays in production or delivery times                     |
|   |                  | Product quality is not effected             | The unit cost is not increased                  | There are no delays in production or delivery times                      |
| 1 | UNIMPORTA<br>NT  |                                             |                                                 |                                                                          |

Source: Adapted from [20]

Risk management involves the company establishing elements that are suitable in terms of infrastructure and culture. By applying a systematic and logical method for establishing the context, identifying, evaluating, treating, monitoring and

communicating risks associated with any activity, function or process in a way that will enable organizations to minimize losses and maximize profits [20-22]. The different stages of risk management are presented in Fig. 7.

- ✓ Establishing the context: The establishing of criteria for risks, the impact of which will affect product quality, costs and production times, is determined by the identified processes, stages and activities. Table 3 shows the criteria used in this research.
- ✓ Risk identification: The identification of risks in terms of what can happen and how it can occur, are contained in the information collected at the identification stage and the description of the proposed methodological design.
- ✓ Risk analysis: The possibility risk occurrence and consequences based on the Qualification matrix and Risk Analysis (Table 4) was measured. The risk evaluation is assigned when the possibility and the consequences of each risk are multiplied. We can see in Table 4 that for each level of consequence and possibility - into a range from one to five- the risk can take values from 1 to 25. The information on the possibility and consequences of risk were provided and coordinated by the company's experienced staff who were directly involved with the process.
- ✓ Risk evaluation: To determine how priority is a risk, we refer to results obtained in the qualification matrix and risk analysis. By observing the various qualifications of risk and its class, considering its value within a range from 1 to 25, the risks can be classified as very low, low, moderate, high or very high.
- ✓ Risk treatment: At this stage, the "Matrix of actions" (Table 5) is created with the aim of proposing and implementing the necessary actions to mitigate the risks of higher priority.

The actions matrix, seeks to minimize risk impacts, deviations or causes that give rise to non-compliance of the product in the different production stages. Through various actions taken at each stage of production, there are aims to

reduce the possibility of occurrence and any negative consequences that may result from the presence of risk or causes of undesired deviations. The effectiveness of the actions will be reflected in the reduction in the occurrence of risks and nonconformity of the product.

The matrix of actions is built on MS Excel worksheets and its structure sequentially shows the causes or risks identified in the different processes that affect the product. In the worksheets the risks are described -what they are and how these risks are presented. Subsequently, the risk assessment is presented in terms of possibility and consequence. This is in order to focus attention on the risk values that are higher, because they represent a greater impact on the deterioration of quality, resource consumption and delays in production and delivery times.

Additionally, containment actions, reaction and prevention are proposed in case of occurrence of the risk. This will allow the operation of any process to make decisions in real time to prevent or contain more serious results.

### 3.5. Monitoring and review

Samples are collected to update the analysis tools in the glass production line are taken at least every two days. This is to maintain the proper functioning of the methodological design. This will help identify any unnatural cause that affects the process or will otherwise recognize if the proposed actions to mitigate the risks are efficient and definitely include them in the process.

Also, the updating of the risks in each of the processes should be performed in a period not exceeding 90 working days, after implementing the action or actions needed to reduce or eliminate these risks in order to identify new causes of deviations. If the actions are effective and permanently eliminate or reduce some of the identified risks, management must keep records of the results contributing to the theme of lessons learned within the organization.

Table 4.  
Matrix Qualification and Risk Analysis

|              |   | POSSIBILITY   |              |            |            |               |
|--------------|---|---------------|--------------|------------|------------|---------------|
|              |   | 1             | 2            | 3          | 4          | 5             |
|              |   | EXCEPTIONALLY | OCCASIONALLY | REGULARLY  | GENERALLY  | ALWAYS        |
| CONSEQUENCES | 5 | 5-Low         | 10-Moderate  | 15-High    | 20-High    | 25- Very High |
|              | 4 | 4-Low         | 8-Moderate   | 12-High    | 16-High    | 20-High       |
|              | 3 | 3-Very Low    | 6-Low        | 9-Moderate | 12-High    | 15-High       |
|              | 2 | 2-Very Low    | 4-Low        | 6-Low      | 8-Moderate | 10-Moderate   |
|              | 1 | 1-Very Low    | 2-Very Low   | 3-Very Low | 4-Low      | 5-Low         |

Source: Adapted from [20]

Table 5.  
Matrix of actions for the process of cutting

| RISK                                         | DESCRIPTION                                                                                                                                                                                                      | POSSIBILITY | CONSEQUENCES | VALUE OF RISK | EVALUATION | CONTAINMENT ACTION                                                                                                              | CORRECTIVE ACTION                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | PREVENTIVE ACTION                                                                                                                                                                                                     | RESPONSIBLE                                       |
|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|--------------|---------------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| No lubrication of the cutting tool           | Fault may occur in the dimensions of the sheet, since, at the time of removing the surplus generated by cutting, these do not follow the cut line and extending in the separation direction causing other damage | 1           | 2            | 2             | Very Low   | The operator must isolate the nonconforming product of the workspace determining the possibility of later use or final disposal | <ul style="list-style-type: none"> <li>- If there are excess in the dimensions must be removed in order to accommodate the dimensions</li> <li>- If there are shortfalls from the dimensions should replace the glass</li> <li>- Where will you find the Frosty borders should adjust the respective setting in the process of polishing straight or Curved</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Verify that this lubricated cutting tool.</li> <li>- In cases where the cutting tool does not have lubrication system, check that the cutting area is lubricated.</li> </ul> | Operator of the cutting process                   |
| Cutting table with glass remains             | The glass may suffer scratches due to the presence of remains of previous cuts adhered to the surface of the cutting table.                                                                                      | 3           | 3            | 9             | Moderate   | The operator must isolate the nonconforming product of the workspace determining the possibility of later use or final disposal | Perform respective treatment in the area of Polish in order to clean up scratches                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Clean the worktable before and after the following operation                                                                                                                                                          | Operator of the cutting process                   |
| No use of equipment for transporting glasses | Sometimes the operator does not use transport equipment and producing partial or total breaks the glass by uncoordinated transport                                                                               | 3           | 5            | 15            | High       | The operator must isolate the nonconforming product of the workspace determining the possibility of later use or final disposal | Replace the glass or remove the area affected to meet specifications                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tools for easy removal of the glass sheet to the storage</li> <li>- Use permanent equipment for the transfer of glasses</li> </ul>                                           | Management<br><br>Operator of the cutting process |

Source: The authors

#### 4. Conclusions

We have presented a methodological design for the identification, treatment, mitigation and monitoring of deviations from product specifications in production processes. In developing the paper we were able to combine statistical and quality tools with international management standards. In addition, we have proposed solutions to mitigate the causes or risks that generate deviations or non-conformances to the monitored product. During the validation of methodological design, some improvements were implemented to minimize the occurrence of risks and to take the best course of action based on the operating characteristics of the company.

The statistical and quality tools helped process the data collected, contributed to the analysis, and helped with understanding and monitoring of processes. Also, graphics monitoring identified any positive or negative change due to

the treatment of risks.

Also, the design and implementation of the "Matrix of Actions", based on the ISO 31000:2009 for risk management, allowed us to make a diagnosis for each of the processes and propose actions to prevent significant risks for the organization.

Finally, The Risk Management process establishes a course of action and proposed activities that guide the operator of the production process to make decisions in real time and to prevent or contain undesirable results. It is suggested that these are applied in an environment of services or production processes that require the use of different types of control charts or instrument for monitoring processes.

#### References

- [1] ISO 9000. (International Standardization for Organization). Basic concepts and language. ISO 9000:2005. Ginebra, Suiza. 2005.

- [2] Cachutt-Alvarado, C., Illada-García, R.A., Barreto-Alvarado, J.R. y Pinto-Rodríguez, F.E., Análisis de los procesos de fabricación en una empresa manufacturera mediante gráficos de control integrado. *Revista Universidad, Ciencia y Tecnología*, 12 (49), pp. 227-234, 2008.
- [3] Díaz, E., Díaz, C., Flores, L. and Heyser, S., Estudio de la variabilidad de proceso en el área de envasado de un producto en polvo. *Revista Información Tecnológica*, 20 (6), pp. 105-113, 2009. DOI: 10.4067/s0718-07642009000600013
- [4] Pineda, U., Estrada, M. and Parra, C.M., Aplicación del modelo Servqual y herramientas de ingeniería de la calidad para la planificación del servicio en la Biblioteca Central de la Universidad de Antioquia. *Revista Interamericana de Bibliotecología*, 34 (3), pp. 243-255, 2011.
- [5] Pérez, P., Control estadístico de calidad multivariado, para el monitoreo e identificación de causas de variabilidad en procesos de crédito del sector financiero. 2012. Obtenido de Universidad Nacional: [www.bdigital.unal.edu.co/8232/1/8910504.2012.pdf](http://www.bdigital.unal.edu.co/8232/1/8910504.2012.pdf)
- [6] Zapata-Gómez, A. Efecto de las técnicas de ingeniería de la calidad en el diseño de productos. *Revista Ingeniería y Universidad*, 17 (2), pp. 409-425, 2013.
- [7] Lee-Ho, L. and Costa-Quinino, R., An attribute control chart for monitoring the variability of a process. *Int. J. Production Economics*, 145, pp 263-267, 2013. DOI: 10.1016/j.ijpe.2013.04.046
- [8] Epprecht, E., Aparisi, F., Ruiz, O. and Veiga, A., Reducing sampling costs in multivariate SPC with a double-dimension T2 control chart. *Int. J. Production Economics*, 144, pp. 90-104, 2013. DOI: 10.1016/j.ijpe.2013.01.022
- [9] Peñabazena-Niebles, R., Oviedo-Trespacios, O., Cuentas-Hernandez, S. and García-Solano, E., Methodology for the implementation of an economic and/or statistical design for x-bar charts with variable parameters (VP). *DYNA*, 81 (184), pp. 150-157, 2014. DOI: 10.15446/dyna.v81n184.35510.
- [10] Peach, R.W., *Manual de ISO*, 3ra ed., México D.F., México: McGraw Hill, 2001.
- [11] Arbeláez, J., et al, Riesgo operacional: Reto actual de las entidades financieras. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 5 (9), pp. 97-110, 2006.
- [12] Botín, J.A., Guzmán, R.R. and Smith, M.L., A methodological model to assist in the optimization and risk management of mining investment decisions. *DYNA*, 78 (170), pp. 221-226, 2011.
- [13] Gasca-Hurtado, G.P., Estudio de similitud del proceso de gestión de riesgos en proyectos de outsourcing de software: utilización de un método. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 9 (17), pp. 119-130, 2010.
- [14] López, C. and Salmerón, J., Ranking risks in ambient intelligence projects. *Journal of Applied Research and Technology*, 9 (3), pp. 419-429 2011.
- [15] Espinosa, F., Dias, A. and Salinas, G., Un procedimiento para evaluar el riesgo de la innovación en la gestión del mantenimiento industrial. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 20 (2), pp. 242-254, 2012. DOI: 10.4067/S0718-33052012000200011
- [16] Martínez, G., Moreno, B. and Rubio, M.C., Gestión del riesgo en proyectos de ingeniería. El caso del campus universitario PTS. Universidad de Granada (España). *DYNA*, 79 (173), pp. 7-14, 2012.
- [17] Pérez-Vidal, A., Amézquita-Marroquín, C.P. and Torres-Lozada, P., Identificación y priorización de peligros como herramientas de la gestión del riesgo en sistemas de distribución de agua potable. *Revista Ingeniería y Universidad*, 16 (2), pp. 449-469, 2012.
- [18] Gómez, R., Pérez, D., Donoso, Y. y Herrera, A., Metodología y gobierno de la gestión de riesgos de tecnologías de la información. *Revista de Ingeniería*, 31, pp. 109-118, 2010. DOI: 10.16924/riua.v0i31.217
- [19] Montgomery C.D., *Introduction to statistical quality control*, 6th Ed., United States of America, John Wiley & Sons, Inc. 2009.
- [20] Poveda-Orjuela, P. and Lopez-Giraldo, M., *Configuración de herramientas guía para la gestión integral de riesgos de inocuidad según ISO 31000 e ISO 22000 (Vol. 1)*. Barranquilla, Colombia: Ediciones Uninorte, 2010.
- [21] NTC-5254 (Norma Técnica Colombiana), *Directrices para la Gestión de Riesgos*, Bogotá, Colombia: ICONTEC, 2007.
- [22] Australian/New Zealand Standard ISO 31000, AS/NZ ISO 31000 Risk Management. Principles and Guidelines. Sidney: AS/NZ S Standards, 2009.

**A.D. Pulido-Rojano**, received his BSc. Eng in Industrial Engineering in 2006 from the Universidad de la Costa, Barranquilla, Colombia, his MSc. degree in Industrial Engineering in 2012 from the Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia, and is currently undertaking his Doctoral Program in Statistics and Optimization, at the Universitat Politècnica de València, Valencia, España. He has worked on various research projects. He is currently a professor in the Industrial Engineering Program at the Universidad Simón Bolívar de Barranquilla, Colombia. His research interests include: inventory, operations management, statistical process control and optimization of process and services.  
ORCID: 0000-0001-5599-7977



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN

FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería Administrativa e  
Ingeniería Industrial

Oferta de Posgrados

Especialización en Gestión Empresarial  
Especialización en Ingeniería Financiera  
Maestría en Ingeniería Administrativa  
Maestría en Ingeniería Industrial  
Doctorado en Ingeniería - Industria y Organizaciones

Mayor información:

E-mail: [acia\\_med@unal.edu.co](mailto:acia_med@unal.edu.co)  
Teléfono: (57-4) 425 52 02

# Learning manager for remote experimentation with optoelectronic devices

Duván Fernando García-Cedeño <sup>a</sup> & Álvaro Bernal-Noreña <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, Colombia. [Duvan.garcia@correounivalle.edu.co](mailto:Duvan.garcia@correounivalle.edu.co)

<sup>b</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, Colombia. [Alvaro.bernal@correounivalle.edu.co](mailto:Alvaro.bernal@correounivalle.edu.co)

Received: July 4<sup>th</sup>, 2014. Received in revised form: July 23<sup>th</sup>, 2015. Accepted: July 29<sup>th</sup>, 2015.

## Abstract

Both the Internet and communications & information technology (ICT), are making a valuable contribution to education. Remote experimentation is an example of the contribution that becomes as a solution to various problems involved with practices in situ, which are a fundamental aspect in the development of skills in engineering education. In this work, we have implemented a learning manager to experience with optoelectronic devices via internet, this tool is composed of a hardware platform comprising a set of electronic components such as light emitting diodes and optocouplers, each one with its respective signal conditioning and communication interfaces; additionally, a Web 2.0 user interface and learning management concepts and content are included. Those facilitate administration and promoting collaborative learning regarding social networks.

**Keywords:** optoelectronic devices, remote experimentation, learning tool, ICT.

# Gestor de aprendizaje para la experimentación remota con dispositivos optoelectrónicos

## Resumen

La internet y las tecnologías de la información y comunicaciones – TIC- están realizando un aporte muy valioso a la educación. La experimentación remota es una muestra de ese aporte que surge como solución a diversos inconvenientes presentes con las prácticas presenciales, las cuales son un aspecto fundamental en el desarrollo de competencias en la educación en ingeniería. En este trabajo se ha implementado un gestor de aprendizaje para la experimentación con dispositivos optoelectrónicos, el cual está compuesto por una plataforma hardware que consta de un conjunto de componentes electrónicos como diodos emisores de luz y optoacopladores, cada uno con su respectiva interfaz de acondicionamiento de señal y comunicación con el servidor; adicionalmente, se desarrolló una interfaz de usuario que incluye utilitarios de la WEB 2.0 y conceptos de sistemas gestores de aprendizaje y contenido, facilitando su administración y promoviendo el aprendizaje colaborativo con el uso de redes sociales.

**Palabras clave:** dispositivos optoelectrónicos, gestor de aprendizaje, experimentación remota, TIC.

## 1. Introducción

La inclusión de las nuevas tecnologías en los procesos de formación está transformando el modelo educativo en cuanto a magnitud y pertinencia, al mismo tiempo que amplía la cobertura con criterios de equidad que permiten mejorar la calidad y potenciar su eficiencia. Hoy en día los procesos de enseñanza y aprendizaje se encuentran atados al uso de las Tecnologías de Información y Comunicaciones -TIC-, siendo cada vez más

esenciales para cumplir estos propósitos; sin embargo, no basta con tener a la disposición estas tecnologías, además de su disponibilidad es necesario diseñar e implementar metodologías apropiadas que faciliten su inclusión en los modelos educativos, proporcionando fuentes de validación y generación de conocimientos que permiten a la comunidad académica ser más competentes en un mundo cada vez más globalizado.

En la ingeniería electrónica el proceso de enseñanza y aprendizaje requiere de la realización de prácticas de laboratorio

que permiten a los estudiantes comprender fácilmente los conceptos expuestos en las clases teóricas. No obstante, muchas prácticas de laboratorio con sistemas reales se encuentran con limitantes de tiempo, equipos de medición e implementos necesarios para su realización, que dificultan el desarrollo de ciertas competencias necesarias para el crecimiento profesional y personal de los estudiantes. Por otra parte, la optoelectrónica ha cobrado gran importancia gracias al uso de muchos dispositivos que utilizan la interacción entre los electrones y el haz de luz, como lo son los sensores que facilitan la medición de variables y disminuyen el consumo de potencia, además de mejorar el transporte de información. Actualmente existen pocos programas académicos que incluyen esta importante área, lo que limita desarrollos favorables de muchos proyectos de investigación relacionados con el tema.

En este trabajo se describe la arquitectura propuesta para un gestor de aprendizaje enfocado a la experimentación con dispositivos optoelectrónicos. Esta arquitectura involucra una plataforma hardware que permite controlar y sensar los dispositivos mediante sistemas microcontrolados, también cuenta con las interfaces de usuario basadas en sistemas gestores de contenido, aprendizaje y motores de bases de datos.

Finalmente, teniendo en cuenta la importancia de los dispositivos optoelectrónicos, se resalta el desarrollo del sistema gestor de aprendizaje, que permitiría a los estudiantes de ingeniería electrónica desarrollar competencias involucrando la interactividad con dispositivos optoelectrónicos, haciendo uso de las TICs y servicios WEB 2.0 en su proceso educativo.

Este artículo se compone de tres secciones: la primera hace referencia a antecedentes y contextualización de los laboratorios remotos en la ingeniería electrónica, la segunda esboza la arquitectura propuesta para el sistema, en la cual se muestra el desarrollo hardware y software; y por último, se muestran los resultados, las conclusiones obtenidas y los trabajos futuros, con los cuales se muestra el aporte significativo del sistema en el campo de los laboratorios remotos educativos, al igual que el impacto social positivo generado.

## 2. Antecedentes y contexto

Las TICs aplicadas en el ámbito educativo, juegan un papel crucial, ya que estimulan el desarrollo de habilidades en el estudiante como la síntesis, el análisis e interpretación, construyendo un pensamiento crítico que permite generar conocimiento, además de contribuir en la conformación de individuos innovadores, creativos y competitivos; así mismo, permite la creación de redes de información colaborativas con el uso de las redes sociales y la ampliación de la cobertura educativa mediante la inclusión de estudiantes con dificultades económicas, de movilidad y/o en condición de discapacidad.

La realización de prácticas de laboratorio de forma remota a través de internet haciendo uso de las TICs, permite a los aprendices tener acceso a diferentes plantas y sensar variables reales, que en muchas ocasiones requieren del uso de equipos de medición y prueba costosos, los cuales se encuentran fuera del alcance de muchas instituciones educativas.

En la actualidad, la investigación en el área de la optoelectrónica se ha incrementado y ha permitido obtener

desarrollos tecnológicos de alto impacto en procesos industriales, mejorando la confiabilidad y los tiempos de respuesta. Teniendo en cuenta dichos desarrollos, es importante que los programas de formación en ingeniería electrónica incluyan o fortalezcan la optoelectrónica en sus currículos para garantizar el desarrollo de competencias en esta área de estudio.

Internacionalmente se encuentra un extenso panorama de proyectos relacionados con laboratorios remotos, cada uno en diferentes áreas como la ingeniería, la química y la física entre otras. En julio de 2012 F. Lerro y colaboradores de la Universidad Nacional del Rosario y la compañía educativa.S.A de Argentina, implementaron un sistema de gestión de aprendizaje y un laboratorio remoto de física electrónica [1]. Actualmente el sistema permite realizar experimentos con el diodo de unión P-N, el diodo zener, el transistor BJT de silicio y germanio, el FET, el diodo emisor de luz infrarrojo y el fototransistor; mediante los cuales pretenden integrar en su currículo de ingeniería electrónica la experimentación activa con dispositivos electrónicos y nuevos desarrollos. En junio de 2012 Eva Besada-Portas y colaboradores de la Universidad Complutense de Madrid España, presentaron una nueva metodología que permite desarrollar laboratorios remotos para la ingeniería y cursos de automatización, este sistema se basa en el uso combinado de un laboratorio servidor de aplicaciones Java, el appletEasy Java Simulations (EJS) y el software TwinCAT [2]. En junio del 2012 Mohamed Tawfik y colaboradores de la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED) de Madrid España, publicaron en una edición especial de una revista impresa muchas soluciones en el desarrollo y las fases de diseño electrónico, al igual que el estado del arte de los laboratorios remotos para aplicaciones industriales de la electrónica y sus etapas de diseño [3]. Igualmente, en el año 2011 en la universidad de Illinois (UIUC) se implementó un laboratorio en el curso de dispositivos electrónicos de estado sólido, que permite realizar mediciones remotas de dispositivos electrónicos, mediante el control de una fuente de medición Keithley haciendo uso de navegadores estándar sin pluggins adicionales, suministrando datos reales a través internet. Este proyecto fue desarrollado por Sumit Dutta y colaboradores [4]. G. Tokdemir y S. Bilgen en mayo de 2008 realizaron un análisis de los modelos actuales de evaluación de la eficacia de los laboratorios remotos, concluyendo que estos laboratorios proporcionan tiempo, ahorran dinero y aumentan la eficiencia en la enseñanza, la evaluación realizada se basa en las interacciones del laboratorio remoto con su entorno y la influencia que tienen en el éxito del estudiante y del curso [5]. En el año 2005 se propone un sistema de educación a distancia por Gao-WeiChang y colaboradores de la Universidad Normal Nacional de Taiwan, denominado Virtual Photonics Experiments Network (V-PEN), que facilita la enseñanza y el aprendizaje de la fotónica, mediante la transformación de experimentos reales en experimentos en línea [6].

De igual forma, en el contexto nacional y local se han desarrollado algunos proyectos relacionados, en junio de 2014 Sebastián Castrillón y colaboradores de la Universidad Nacional de Colombia implementaron un prototipo de infraestructura virtual para la enseñanza y el desarrollo de

laboratorios en las áreas de automatización industrial y comunicaciones industriales [7]. El prototipo propuesto permite que las prácticas sean desarrolladas remotamente mediante el uso de Internet, la virtualización de VMware y la gestión a través de NetLab. Así mismo, se destacan los proyectos llevados a cabo por el grupo de investigación de Arquitecturas Digitales y Microelectrónica de la Universidad del Valle [8-10]. El primer desarrollo permite la operación vía web de una planta prototipo de generación hidroeléctrica, mientras que los otros dos proyectos permiten caracterizar algunos dispositivos electrónicos como el diodo de unión P-N, diodo zener, transistores BJT y FET, por medio del uso de una interfaz gráfica de usuario para la visualización de curvas características y datos reales, los sistemas se desarrollaron con el software LabView y el lenguaje de programación JAVA. Por otra parte, en abril de 2010 Ana Lilian Valencia y colaboradores de la Universidad del Valle desarrollaron una aplicación interactiva para la educación en dinámica estructural [11]. La aplicación integra simulaciones, animaciones, formulaciones matemáticas e interacción para apoyar el proceso de aprendizaje de los estudiantes.

Un laboratorio remoto es un conjunto de equipos físicos que se pueden operar y controlar remotamente, utilizando una interfaz determinada. Estos equipos pueden ser didácticos como las maquetas de laboratorio o equipos industriales como los que pueda tener un banco de pruebas. Estos laboratorios requieren de servidores específicos que gestionan tanto a los usuarios del sistema como los equipos integrados en dichos sistemas [12]. En la actualidad se busca implementar este tipo de laboratorios en varias áreas del conocimiento, permitiendo su uso las 24 horas del día desde cualquier lugar en el que se cuente con internet, igualmente, se busca incluir las TICs y potencialidad de la WEB 2.0 que permite crear redes de conocimiento pluricultural, promoviendo una mirada mucho más amplia del entorno y creando soluciones más completas a los diferentes problemas que se encuentran a diario [13].

Los dispositivos optoelectrónicos son aquellos que trabajan conjuntamente con señales electrónicas y ópticas.

Más concretamente son capaces de transformar señales electrónicas en ópticas o viceversa. Sus aplicaciones son muy extensas y variadas, pero fundamentalmente se aplican en circuitos de comunicaciones, sistemas de señalización, productos de consumo masivo, tecnología espacial y física de partículas [14,15]. Teniendo en cuenta la importancia actual de estos dispositivos, es imprescindible que el estudiante desarrolle habilidades en este campo del conocimiento, haciendo uso del aprendizaje activo por medio de la caracterización a través de circuitos de prueba, midiendo las variables presentes y analizándolas para comprender su comportamiento. Sin embargo, esto requiere de sistemas para la adquisición de datos y señales, software especializado y circuitos complementarios de control y acondicionamiento de señal, que en muchas ocasiones no se encuentran al alcance de las instituciones y/o estudiantes, debido al costo que implica adquirirlos. Por tal motivo, es importante que los laboratorios cuenten con los recursos mínimos necesarios para que el proceso de formación experiencial sea exitoso. La inclusión de las TICs en estos sistemas facilitaría el uso compartido del recurso y potenciaría la disponibilidad en comparación con los laboratorios presenciales. De esta forma, se alcanzarán dos objetivos que mejoran el proceso de enseñanza-aprendizaje: el primero es realizar las prácticas de laboratorio de manera ampliada con los dispositivos optoelectrónicos y el segundo, incentivar y desarrollar el uso de las TICs por parte de los estudiantes.

La Web 2.0 permite el uso de servicios basados en aplicaciones sociales que facilitan la comunicación e interacción con contenidos multimediales. La integración de la Web 2.0 en la educación propone un gran cambio que genera una visión innovadora, además de gestionar el conocimiento a nivel organizacional y personal. Las diferentes aplicaciones y contenidos sociales, entre los que encontramos los blogs, servicios RSS, fotos, videos, wikis, marcadores sociales, etc., se han convertido en un gran material de apoyo de procesos educativos que pretenden impulsar el aprendizaje colaborativo principalmente en las universidades.

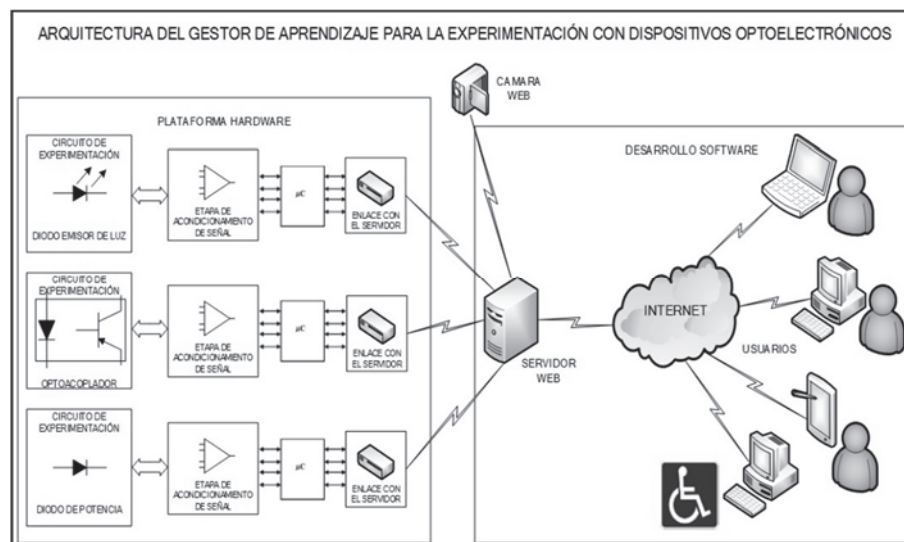


Figura 1. Arquitectura implementada.

Fuente: Elaboración propia.

### 3. Arquitectura Implementada

En la Fig. 1 se muestra la arquitectura implementada en el gestor de aprendizaje para la experimentación con dispositivos optoelectrónicos, en ella se identifican dos partes principales, la primera hace referencia a la plataforma hardware diseñada para la experimentación con cada uno de los dispositivos seleccionados, al igual que los circuitos de comunicación con el servidor; la segunda parte corresponde a las interfaces de usuario que permiten controlar cada circuito experimental mediante el envío de tramas de configuración, reciben los resultados de experimentación y los presentan mediante graficas de curvas características o valores numéricos de las variables sensadas, por otra parte, permiten la administración y el acceso de usuarios al sistema, así como la generación de reportes de la experimentación para que los estudiantes los descarguen y realicen el informe de laboratorio.

#### 3.1. Desarrollo hardware

La plataforma hardware de experimentación concebida, permite la interacción con algunos dispositivos optoelectrónicos y el diodo de potencia, entre los dispositivos optoelectrónicos con los cuales cuenta el laboratorio están los diodos emisores de luz (LED) y el optoacoplador. La plataforma hardware se ha diseñado para que se interactúe de manera independiente con cada dispositivo, esto se observa en el primer bloque (Ver Fig.1), que hace referencia a los circuitos y componentes necesarios de experimentación. El segundo bloque se compone por los circuitos que realizan el acondicionamiento de señal, los cuales se encargan de entregar las señales que deben ser procesadas por la unidad de control. El siguiente bloque está compuesto por la unidad de procesamiento o control, que es la encargada de recibir las tramas de configuración enviadas por el usuario, interpretarlas y enviar las señales de control y excitación al circuito de experimentación, además de digitalizar las señales de respuesta y enviarlas al usuario mediante el cuarto bloque que es el enlace con el servidor, es decir, es el que permite la comunicación entre el computador y los circuitos de experimentación de cada dispositivo

##### 3.1.1 Arquitectura hardware para la experimentación con los diodos emisores de luz (LED's)

El circuito de experimentación implementado con los diodos emisores de luz permite sensar la corriente circulante a través del diodo y la caída de tensión en el mismo. Este circuito se encuentra alimentado con una fuente de voltaje variable DC que se controla por un DAC y un amplificador operacional, el rango de operación es de 0V a 10 V. Para la experimentación se hace un barrido de voltajes y se realiza una medición de la corriente y tensión del diodo para cada incremento de la fuente de alimentación, con el fin de graficar la curva característica de  $I_d$  vs  $V_d$ , la cual es visualizada por medio de la interfaz de usuario, permitiendo que el estudiante desarrolle habilidades para la interpretación y análisis de resultados. La plataforma desarrollada cuenta con cinco

diodos emisores de luz de diferente color (infrarrojo, amarillo, rojo, azul y blanco), que debido a sus diferencias de longitud de onda presentan diferentes curvas características, en las que se resalta el voltaje umbral. Como se tienen cinco LEDs, se utilizan interruptores bilaterales de cuadrángulo CMOS para que el estudiante pueda realizar la experimentación con los LEDs de manera individual o grupal y visualice de una forma más clara su comportamiento. Es importante aclarar que la fuente de voltaje permite controlar el  $\Delta V$  de manera manual o automática, con la finalidad que el estudiante realice una recolección de datos que le permita extraer con mayor precisión los parámetros del dispositivo. Por otra parte, el circuito posee un LM35 que permite sensar la temperatura ambiente para que el estudiante observe la sensibilidad a los cambios de temperatura que presentan los dispositivos semiconductores. Para el acondicionamiento de señal se usaron varios amplificadores operacionales que manejan los pequeños cambios en las variables sensadas con mayor exactitud. El microcontrolador es el encargado de generar las señales de control de los interruptores bilaterales de cuadrángulo para la activación de los circuitos de experimentación de cada uno de los LEDs, igualmente genera las señales digitales que controlan la fuente de voltaje, mientras que los canales del puerto análogo-digital son conectados a cada uno de los nodos correspondientes para el sensado de las variables para la caracterización. Por último, se encuentra el circuito que se encarga de la comunicación entre el computador y la unidad de control, permitiendo el envío y recepción de las tramas de configuración y respuesta, las tramas de respuesta contienen los datos de experimentación sensados que son procesados en el computador y visualizados en la interfaz gráfica de usuario.

##### 3.1.2 Arquitectura hardware para la experimentación con el optoacoplador

Para la experimentación con el optoacoplador se diseñaron dos circuitos que permiten conocer la forma de onda de la señal de entrada y salida, los tiempos de respuesta y algunas configuraciones usadas en la transmisión de información. Las configuraciones implementadas son la de seguidor e inversor de señal TTL, con las cuales el estudiante puede explorar con diversos sistemas de comunicación. Para la implementación de las configuraciones se hizo necesario el uso de dos optoacopladores, dos unidades de control interconectadas mediante comunicación SPI, además del uso de los módulos de captura de cada una. En la etapa de acondicionamiento de señal se usaron dos multiplexores análogos de 4 a 1 que permiten variar los valores de las resistencias en el circuito de experimentación de cada configuración. La variación de estas resistencias facilita al estudiante la visualización de los tiempos de respuesta dependiendo de la frecuencia de la señal transmitida. La unidad de control se encarga de sensar los niveles de tensión de las señales de entrada y salida del optoacoplador, además de generar la señal TTL de entrada. La captura de los tiempos de retardo presentes en los flancos de subida y bajada de la señal de salida con respecto a la señal de entrada se realiza con el uso de los módulos de captura presentes en la unidad

de control, estos tiempos proporcionan información necesaria durante el análisis del funcionamiento del optoacoplador, mejorando la comprensión y el desarrollo de las competencias relacionadas con éste. Por último, después del procesamiento de las señales, la unidad de control envía los resultados obtenidos en la experimentación a través de las tramas de comunicación al servidor, que se encarga de organizar dicha información y mostrarla al usuario en la interfaz gráfica.

### 3.1.3 Arquitectura hardware para la experimentación con el optoacoplador

En la electrónica de potencia existen muchos dispositivos de gran importancia, pero el diodo de potencia está presente en muchos circuitos de implementación y es el punto inicial de trabajo en esta área, por tal motivo se ha seleccionado como el dispositivo de experimentación base, por otra parte, su funcionamiento es muy similar al de los diodos emisores de luz en cuanto a que presentan una tensión umbral en polarización directa y en inversa impiden el paso de corriente, aunque difieren en los rangos de operación, es decir corrientes y tensiones máximas. Para la experimentación del diodo de potencia se implementó un circuito serie entre una resistencia de potencia y un diodo 40EPS08, además de ampliar el rango de trabajo correspondiente a la corriente y la tensión de alimentación del circuito. Como su principal uso es la rectificación, inicialmente se polariza en sentido inverso y se mide la corriente y la tensión en el diodo, posteriormente se cambia la polarización de la fuente de alimentación provocando la polarización directa del diodo y se repite el proceso de medición de la corriente y la tensión en éste. Es importante aclarar que la fuente de alimentación del circuito es una fuente reductora que suministra aproximadamente entre 0Vdc y 70Vdc, la cual es controlada por la unidad de procesamiento mediante una señal PWM. La corriente se encuentra limitada por la resistencia serie del circuito y es de aproximadamente 1A. El circuito de acondicionamiento de señal usa un optoacoplador que transmite la señal PWM desde la unidad de control hasta el circuito de potencia de la fuente de alimentación, demostrando la importancia del acoplamiento óptico. En la medición de la tensión de alimentación y del diodo se utilizó un amplificador de aislamiento con ganancia variable, que entrega señales que se encuentran dentro del rango de operación de la unidad de control asegurando su integridad. Para la medición de la corriente del circuito de experimentación se utilizó un sensor de corriente HX 03-P de LEM, conectado en serie con el diodo y que entrega valores de tensión equivalentes a la corriente circulante. Finalmente, después del procesamiento de las variables sensadas por parte de la unidad de control, ésta se encarga de enviar mediante las tramas de comunicación los datos experimentales obtenidos, que posteriormente son graficados en la interfaz de usuario para su visualización.

### 3.2. Desarrollo software

En el mundo actual, el uso de la tecnología en la educación pretende acercar los espacios de experimentación real a los estudiantes, siendo este el caso de los laboratorios remotos. Teniendo en cuenta la bibliografía, siempre se buscan desarrollos

software que consideren las aplicaciones cliente/servidor, involucrando interfaces de usuario para facilitar el control de plantas de experimentación. No obstante, el uso de interfaces de usuario no siempre asegura el aprendizaje de los conceptos por parte del estudiante, especialmente en el caso de la experimentación con dispositivos como los optoelectrónicos o de potencia, por tal motivo se hace necesario desarrollar un sistema software que acerque en lo posible los resultados digitalizados a los resultados experienciales, es decir usar dispositivos reales bajo prueba que se controlen por medio de interfaces de usuario que incluyan conceptos de la Web 2.0, además de contener aplicaciones sociales que fomenten el aprendizaje colaborativo. Lo anterior presenta la necesidad de desarrollar una aplicación que incluya todas estas potencialidades a través de una sola plataforma, mejorando las metodologías de enseñanza/aprendizaje y los diseños de la arquitectura hardware y software.

La aplicación software desarrollada pretende brindar a los estudiantes el control de una tarjeta de experimentación que cuenta con los dispositivos optoelectrónicos y de potencia seleccionados, facilitando el análisis de señales para su caracterización. De igual forma, presenta información relacionada con los dispositivos en cuestión, esta información se encuentra disponible en el sitio web del gestor de aprendizaje. Adicionalmente, los estudiantes integrantes del curso tienen la posibilidad de compartir información e interactuar a través de diversas aplicaciones de redes sociales presentes en el portal. Por otra parte, la aplicación diferencia los tipos de usuario habilitados y presenta información correspondiente a estos, entre los usuarios habilitados se encuentran los usuarios docentes, usuarios estudiantes y los usuarios no registrados, cada uno con permisos y restricciones en el uso de la plataforma. En la Fig.2 se presenta la forma en que el sistema interactúa con los usuarios.

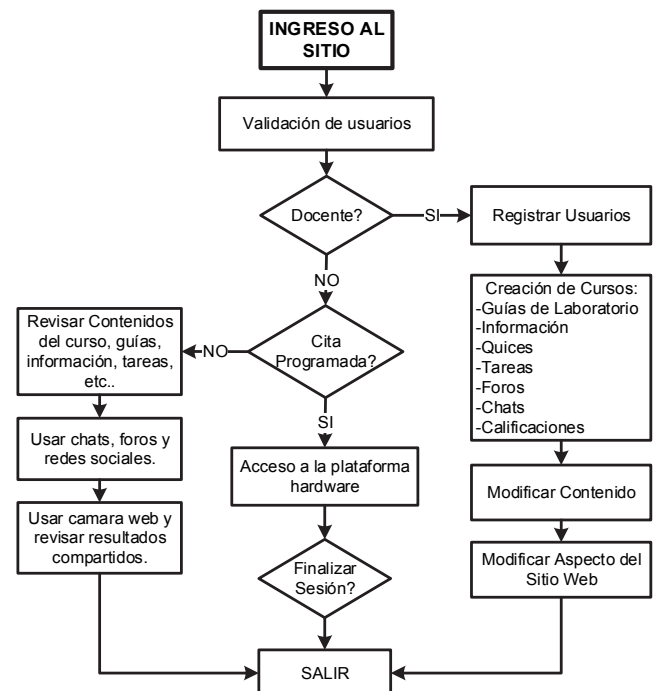


Figura 2. Diagrama de flujo interacción entre el usuario y el sistema. Fuente: Elaboración propia.

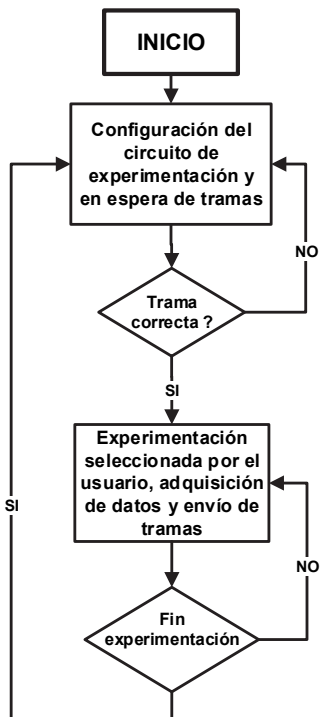


Figura 3. Diagrama de flujo de microcontroladores.  
Fuente: Elaboración propia.

Para la puesta en marcha de la interfaz gráfica de usuario se requiere de la instalación de la herramienta WampServer, que incluye una base de datos MySQL, un servidor web Apache y un intérprete de PHP; por medio de la base de datos MySQL se administran diversos contenidos del portal y el registro de usuarios. Adicionalmente, se usó un sistema gestor de contenido (CMS), que permite organizar de una manera más simple el contenido de la interfaz de usuario. Actualmente el hardware de experimentación puede ser accedido de manera concurrente por un máximo de 3 usuarios, uno por cada dispositivo, motivo por el cual se implementó un administrador de citas que asegura la disponibilidad del recurso de experimentación por un tiempo suficiente para la práctica. El administrador de citas almacena la información de usuario en la base de datos del sistema y habilita el hardware si se accede en el horario establecido, el resto de usuarios que no tienen cita o que acceden en horarios adicionales a su cita pueden observar parte de la experimentación de otro usuario y acceder a algunas de las herramientas que el portal proporciona. Entre las herramientas y servicios encontramos aplicaciones sociales, módulos Wiki, talleres, guías, encuestas, tareas, entre otros, lo cual permite la comunicación entre usuarios para compartir experiencias y observaciones obtenidas durante la práctica. Es importante resaltar que el sistema incluye una cámara web que permite la observación en tiempo real del funcionamiento visual de los dispositivos.

Por otra parte, en el desarrollo software también se debe incluir el código de programación de las unidades de control presentes en la tarjeta de experimentación, las cuales son las encargadas de administrar el acceso y generar las señales de

|                    |                    |        |        |        |        |        |                   |
|--------------------|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------------|
| CABECERA 1<br>0x6E | CABECERA 2<br>0x6E | DATO 1 | DATO 2 | DATO 3 | DATO 4 | DATO 5 | FIN TRAMA<br>0x7D |
|--------------------|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------------|

Figura 4. Trama de comunicación.  
Fuente: Elaboración propia.

control para cada uno de los circuitos de experimentación, además de sensar las variables y enviar los datos reales al servidor para el análisis de estos por parte del estudiante. El diagrama de flujo correspondiente al proceso de cada unidad de control para la captura de los resultados de experimentación es presentado en la Fig.3.

En el proceso de comunicación entre el servidor y cada una de las unidades de control se utilizó una trama de comunicación conformada por ocho (8) campos, los dos (2) primeros corresponden a la cabecera de trama, los siguientes cinco (5) son usados para el envío de datos y el último es el final de trama, que asegura una trama correcta evitando una configuración errónea, en la Fig.4 se presenta la trama de comunicación definida para el intercambio de información.

Como se mencionó anteriormente, la trama de comunicación se utiliza en el proceso inicial de configuración de los circuitos de experimentación, al igual que en el proceso de envío hacia el servidor de los resultados obtenidos, por lo tanto, en el caso de una trama de configuración se usan valores predefinidos que son decodificados por cada unidad de procesamiento para seleccionar las señales control indicadas, mientras que en el caso de una trama de respuesta o resultados, los campos son usados para el envío de los datos sensados durante la experimentación.

#### 4. Resultados

El gestor de aprendizaje diseñado proporciona al usuario el acceso al portal web para programar una cita y realizar la experimentación con los dispositivos habilitados, facilitando y asegurando la experimentación remota, adicionalmente, después de ingresar al sistema en el horario de la cita, el usuario adquiere el control de la plataforma hardware y ejecuta las acciones soportadas que considere pertinentes para su experimentación, por otra parte, la plataforma le permite visualizar los datos reales de experimentación con el uso de tablas y gráficas de manera agradable, igualmente, el usuario puede compartir información y datos obtenidos durante la realización de su práctica a través de las aplicaciones sociales y herramientas incluidas en el sitio web, lo cual fomenta y apoya el aprendizaje colaborativo. Finalmente, el usuario tiene la opción de descargar el reporte de su experimentación, que incluye de manera detallada los datos de las variables sensadas, al igual que las gráficas de curvas características, siendo un soporte para la realización del informe que le permite centrarse en el análisis y comprensión de las características de funcionamiento.

Para validar el funcionamiento del gestor de aprendizaje se realizaron varias pruebas con los estudiantes, los cuales se registraron, programaron su cita e ingresaron al sistema para realizar la experimentación con cada uno de los dispositivos. Los resultados obtenidos en estas pruebas se despliegan a través de curvas características.

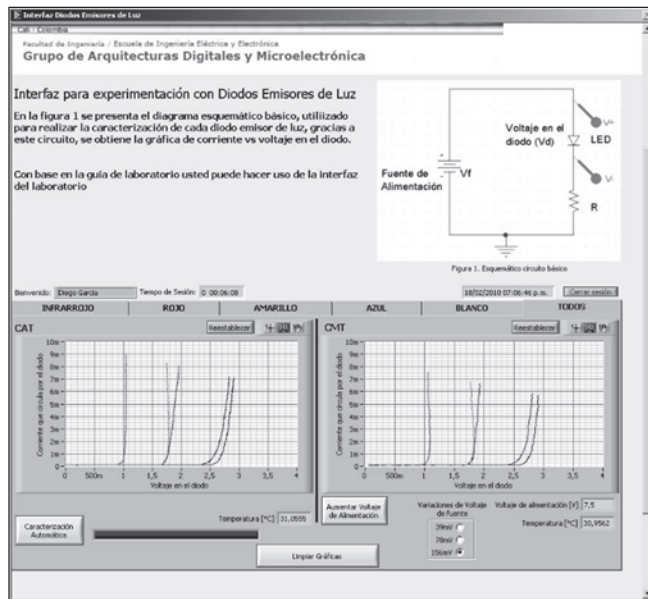


Figura 5. Interfaz gráfica Diodos Emisores de Luz.  
Fuente: Elaboración propia.

En la Fig.5 se observan las curvas características de  $I_d$  vs  $V_d$  obtenidas de la experimentación con los diodos emisores de luz, en el lado derecho se observa la gráfica correspondiente a la experimentación manual, en la cual el usuario selecciona el incremento de la fuente de voltaje y la cantidad de muestras a tomar, mientras que la gráfica del lado izquierdo hace referencia a la experimentación automática, la cual realiza un barrido por todos los valores de la fuente de alimentación con el menor incremento posible. Igualmente, en la Fig.5 se observa un campo correspondiente al dato de temperatura ambiente del circuito.

La Fig.6 muestra la interfaz gráfica de usuario para la interacción con los circuitos de experimentación del optoacoplador, en ésta se observa el circuito esquemático experimental, el campo de selección de los valores de resistencias a usar y un espacio donde se grafican las señales TTL de entrada y salida en tres puntos especificados en el esquemático. El campo de selección de resistencias permite realizar 14 combinaciones que sirven para analizar el comportamiento del circuito en cuanto a niveles de tensión y tiempos de respuesta de manera gráfica.

La interfaz de usuario para la experimentación con el diodo de potencia se muestra en la Fig.7, en la cual se observa el circuito esquemático experimental y la gráfica de la curva característica de  $I_d$  vs  $V_d$  obtenida de la experimentación, la curva obtenida inicia desde tensiones negativas con corrientes casi nulas y termina en tensiones y corrientes cercanas a la unidad.

Por último, en la Fig.8 se muestra la tarjeta de circuito impreso diseñada para las fuentes de alimentación de las unidades de control, la cual se implementó con una fuente conmutada compuesta por el circuito integrado LT3501 de Linear Technology

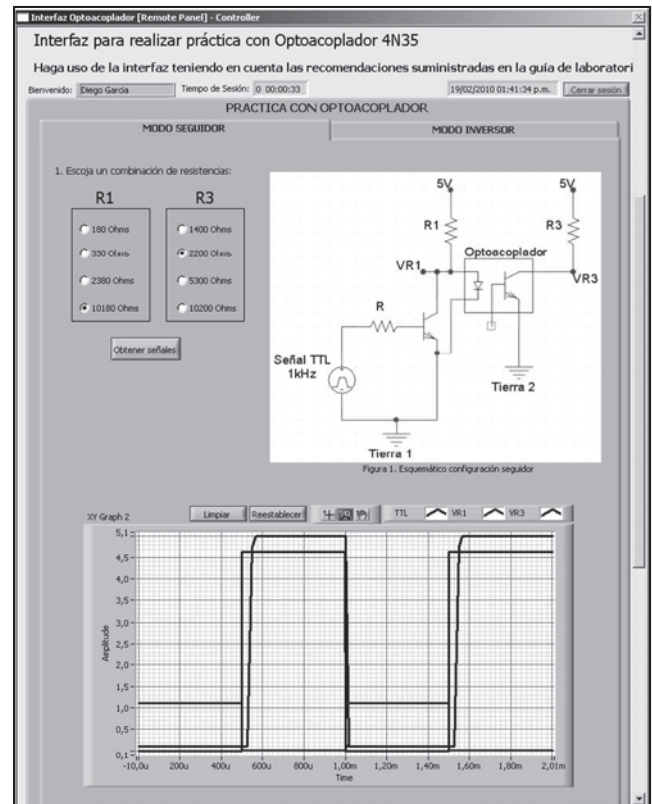


Figura 6. Interfaz gráfica Optoacoplador.  
Fuente: Elaboración propia.

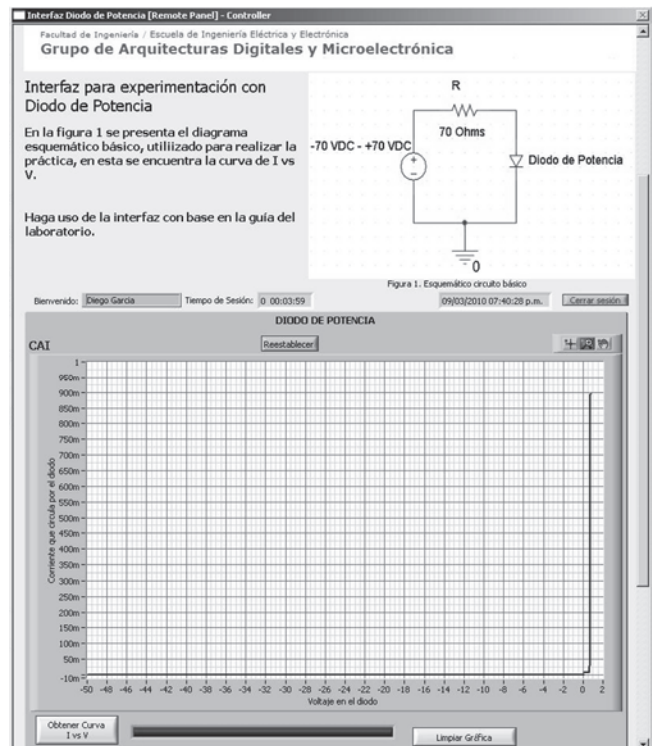


Figura 7. Interfaz gráfica Diodo de Potencia.  
Fuente: Elaboración propia.

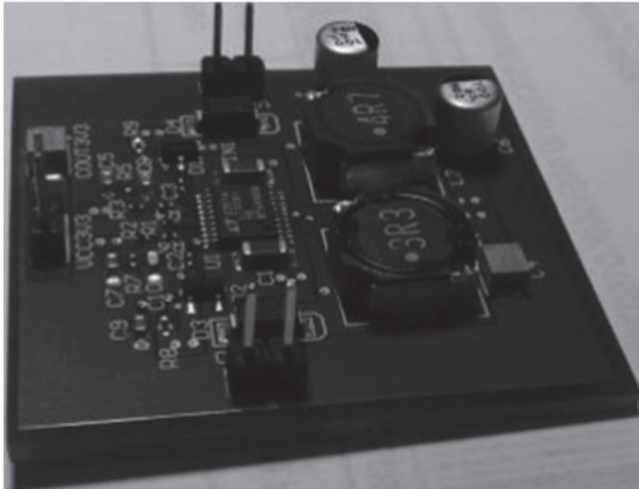


Figura 8. Tarjeta de alimentación unidad de control.  
Fuente: Elaboración propia.

Como el gestor de aprendizaje incluye un desarrollo hardware y software, era necesario evaluar la funcionalidad de la aplicación desarrollada, para este fin se diseñó una encuesta que permitiera establecer la percepción por parte del usuario y cuáles son los aspectos positivos y/o negativos presentes. Los interrogantes presentes en la encuesta evalúan principalmente si el sistema permite realizar la actividad lo más rápido posible y de forma confiable, si los resultados obtenidos le permiten comprender el funcionamiento característico de los dispositivos y si la labor realizada lo deja satisfecho. La encuesta se ha aplicado a una muestra de 20 estudiantes y se encuentra actualmente bajo prueba con un total de 85% de aceptación y éxito.

## 5. Conclusiones y trabajos futuros

El sistema concebido es un progreso significativo en el campo de los laboratorios remotos educativos, aportando su aplicación a nuevas áreas del conocimiento como es el caso de la optoelectrónica, cabe destacar que este tipo de avances y/o aplicaciones son un aporte que genera un impacto social positivo al incrementar la cobertura y que en ningún momento pretenden reemplazar los laboratorios presenciales. Adicionalmente, estos sistemas permiten que los estudiantes realicen las actividades necesarias para la obtención de nuevos conocimientos y el desarrollo de competencias al proporcionar las herramientas e implementos necesarios durante las prácticas de laboratorio, del mismo modo, el sistema evita gastos por parte de los estudiantes relacionados con la compra de implementos y disminuye el consumo de materiales perjudiciales para el medio ambiente al igual que el consumo de energía.

Finalmente, los datos experimentales obtenidos durante el desarrollo de las prácticas con el sistema gestor de aprendizaje, se encuentran dentro del rango de resultados de las prácticas de laboratorio presencial, demostrando la validez del sistema en el proceso de enseñanza/aprendizaje, además de incentivar el aprendizaje colaborativo con la publicación de resultados mediante el uso de las redes sociales que hacen parte de las TICs.

Dentro de los trabajos futuros, en primera medida se puede ha planteado la implementación de las mejoras propuestas por los usuarios del sistema y la integración de otros dispositivos optoelectrónicos, por otra parte, el principal trabajo futuro está en desarrollar una aplicación software que permita la accesibilidad al sistema desde dispositivos móviles que implemente una metodología de enseñanza-aprendizaje adecuada.

## Reconocimientos

Este artículo es producto de un proyecto de investigación financiado por convocatoria interna de la Universidad del Valle, por lo tanto, se agradece a la Universidad del Valle por el financiamiento suministrado.

## Referencias

- [1] Lerro, F., Marchisio, S., Martini, S., Massacesi, H., Perretta, E., Gimenez, A., Aimetti, N. and Oshiro, J., Integration of an e-learning platform and a remote laboratory for the experimental training at distance in engineering education, Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV), 2012 9th International Conference on IEEE, pp. 1-5, 2012. DOI: 10.1109/REV.2012.6293119
- [2] Besada-Portas, E., Lopez-Orozco, J., De la Torre, L. and De la Cruz, J., Remote control laboratory using EJS applets and twin CAT programmable logic controllers. IEEE Transactions, [Online]. 56 (2), pp. 156-164, 2012. DOI: 10.1109/TE.2012.2204754
- [3] Tawfik, M., Sancristobal, E., Martin, S., Diaz, G. and Castro, M., State-of-the-Art remote laboratories for industrial electronics applications, Technologies Applied to Electronics Teaching (TAEE), IEEE, pp. 359-364, 2012. DOI:10.1109/TAEE.2012.6235465
- [4] Dutta, S., Prakash, S., Estrada, D. and Pop, E., A web service and interface for remote electronic device characterization. IEEE Transactions, [Online]. 54 (4), pp. 646-651. 2011. DOI: 10.1109/TE.2011.2105488
- [5] Tokdemir, G. and Bilgen, S., Remote lab effectiveness assessment model, Optimization of Electrical and Electronic Equipment, OPTIM, 11th International Conference IEEE, pp. 234-239, 2008. DOI: 10.1109/OPTIM.2008.4639517
- [6] Chang, G., Yeh, Z., Chang, H. and Pan, S., Teaching photonics laboratory using remote-control web technologies. IEEE Transactions, [Online]. 48 (4), pp. 642-651. 2005. DOI: 10.1109/TE.2005.850716
- [7] Castrillón, S., Hincapié, L. and Zapata, G., Remote laboratory prototype for automation of industrial processes and communications tests. DYNA, [Online]. 81 (185), pp. 19-23. 2014. DOI: 10.15446/dyna.v81n185.44145
- [8] Cardozo, C., El Helou, W., Bernal, A. and Ortiz, R., Computational system for the remote operation of a prototype hydroelectric plant through the web. DYNA, [Online] 79 (174), pp. 14-23. 2012. Available at: <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v79n174/v79n174a02.pdf>
- [9] García, D., Torres, P. y Bernal, A., Diseño e implementación de un laboratorio remoto para la experimentación con dispositivos electrónicos ópticos y de potencia. Tesis, Universidad del Valle, Cali, Colombia, 2010.
- [10] Ibarra, C.A., Medina, S. y Bernal, A., Implementación de un laboratorio virtual para el estudio de dispositivos electrónicos. Tesis, Universidad del Valle, Cali, Colombia, 2007.
- [11] Valencia, A., Ramírez, J., Gómez, D. and Thomson, P., Aplicación interactiva para la educación en dinámica estructural. DYNA, [Online] 78 (165), pp. 72-83. 2011. Available at: <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v78n165/a07v78n165.pdf>
- [12] Aliane, N., Fernández, J., Martínez, A. y Ortiz, J., Un laboratorio de ingeniería de control basado en Internet. Información Tecnológica, [Online]. 18 (6), pp. 19-26. 2007. DOI: 10.4067/S0718-07642007000600004

- [13] Ministerio de Educación Nacional de Colombia, Altablero, el periódico de un país que educa y que se educa. Tecnologías de información y comunicaciones. Consideraciones para una Política sobre nuevas tecnologías y educación. [Online]. [Consulted November 20, 2013]. Available at: <http://www.mineduacion.gov.co/1621/propertyvalue-31330.html>
- [14] Sendra-Sendra, J.R., Dispositivos Optoelectrónicos. [Online] 2001. [Consulted July 12, 2013]. Available at: [http://www.iuma.ulpgc.es/~jrsendra/Docencia/dispositivos\\_optoelectronicos/download/teoria/apuntes/curso00-01.pdf](http://www.iuma.ulpgc.es/~jrsendra/Docencia/dispositivos_optoelectronicos/download/teoria/apuntes/curso00-01.pdf)
- [15] Dispositivos Semiconductores, Material de Clases. Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Argentina. [Online]. 2do Cuatrimestre de 2011. [Consulted October 15, 2012]. Available at: [http://materias.fi.uba.ar/6625/Clases/Dispositivos\\_Optoelectronicos.pdf](http://materias.fi.uba.ar/6625/Clases/Dispositivos_Optoelectronicos.pdf)

**D.F. García-Cedeño**, received the BSc. Eng in Electronic Engineering in 2010 from the Universidad del Valle, Cali, Colombia. From 2007 to currently, he worked with the investigation group: Arquitecturas digitales y microelectrónica de Universidad del Valle. Currently, he is a professor the electronic devices and computer architecture in the Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, Colombia. His research interests include: simulation, electronic modeling, remote laboratories and optoelectronics devices.

ORCID: 0000-0003-3728-2913

**A. Bernal-Noreña**, received the BSc. Eng in Electrical Engineer in 1987 from Universidad del Valle, Cali, Colombia, the MSc degree in Science in Electrical Engineering majoring in VLSI circuit design from Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil in 1997, and the PhD degree in Microelectronics from Institute National Polytechnique de Grenoble, Grenoble, France in 1999. He was joined Microelectronic Group - Universidad del Valle, where a development project oriented to improve the national technological capacities was executed. News methodologies and the updating in technologies & tools in microelectronic applications were explored and remote laboratories. From March - 1990 he was joined Integrated Systems Laboratory (LSI) in the VLSI System Design Methodologies Group where was started a Research and Development work about FORTH oriented Microprocessors, sponsored by FAPESP and Banco do Brasil. He is a full professor in the Facultad de Ingenierías of Universidad del Valle, Cali, Colombia.

ORCID: 0000-0003-4766-8086



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN  
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería  
Eléctrica e Ingeniería de Control

Oferta de Posgrados

Maestría en Ingeniería - Ingeniería Eléctrica

Mayor información:

E-mail: [ingelcontro\\_med@unal.edu.co](mailto:ingelcontro_med@unal.edu.co)  
Teléfono: (57-4) 425 52 64

## A comparative study of two aging and fusion methods in the synthesis of zeolitic materials from natural clinker

Jeimer Alexander Lizcano-Cabeza <sup>a</sup>, Luis Fernando Ávila-Ascanio <sup>a</sup>, Carlos Alberto Ríos-Reyes <sup>b</sup>  
& Luz Yolanda Vargas-Fiallo <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Escuela de Química, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, [jalc91@hotmail.com](mailto:jalc91@hotmail.com)

<sup>a</sup> Escuela de Química, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, [luisferavi@hotmail.com](mailto:luisferavi@hotmail.com)

<sup>a</sup> Escuela de Química, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, [levargas@uis.edu.co](mailto:levargas@uis.edu.co)

<sup>b</sup> Escuela de Geología, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, [carios@uis.edu.co](mailto:carios@uis.edu.co)

Received: June 30<sup>th</sup>, 2014. Received in revised form: May 5<sup>th</sup>, 2015. Accepted: July 28<sup>th</sup>, 2015.

### Abstract

A sample of Colombian natural clinker was evaluated as a raw material in a laboratory-scale synthesis of zeolitic materials using two methods of alkaline fusion, followed by two aging methods, and finally hydrothermal treatment during three different periods of time. Fusion was carried out with solid and aqueous NaOH and followed by static or ultrasonic aging. The process ended with a hydrothermal reaction. Natural clinker was converted into several zeolitic materials. The characteristics of the resulting zeolitic materials and the effects of experimental variations are discussed.

**Keywords:** natural clinker; aging method; synthesis; zeolitic materials; fusion.

## Estudio comparativo de dos métodos de envejecimiento y fusión en la síntesis de materiales zeolíticos a partir de clinker natural

### Resumen

Una muestra de clinker natural colombiano fue evaluado como material de partida para una síntesis a escala de laboratorio de materiales zeolíticos usando dos métodos de fusión alcalina seguida de dos métodos de envejecimiento y finalmente un tratamiento hidrotérmico bajo tres periodos de tiempo distintos. La fusión se llevó a cabo usando NaOH sólido y en solución, siendo seguida por envejecimiento en condiciones estáticas o de ultrasonido. El proceso finalizó con una reacción hidrotérmica. El clinker natural fue convertido en varios materiales zeolíticos. Las características de los materiales zeolíticos resultantes y los efectos de las variaciones experimentales son discutidos.

**Palabras clave:** clinker natural; método de envejecimiento; síntesis; materiales zeolíticos; fusión.

### 1. Introduction

Zeolite synthesis from coal by-products like natural clinker (NC) using several methods has recently been receiving a lot of attention. Since the pioneering works of Höller and Barth-Wirsching [1] and Ríos et al. [2] who were the first researchers to have synthesized zeolites from fly ashes and natural clinker respectively, much investigation has been conducted to convert these coal by-products to zeolites. The conversion of coal by-products

into zeolites can be conventionally developed by hydrothermal crystallization under alkaline conditions, which has been reported by different authors [1–16]. Recently, the conventional alkaline conversion of these materials has been improved by using more sophisticated treatments [17–23]. Zeolites have been useful, mainly as ion exchangers, molecular sieves, adsorbents, and catalysts. The resultant zeolitic materials have great potential to be developed as high-efficiency low-cost adsorbents with applications in environmental problems

[24–27]. In this paper, several fusion, aging, and hydrothermal conditions in the synthesis of zeolites were tested, promoting the formation of different types of zeolites and hopefully, more crystalline phases. For that reason, an investigation into the synthesis of zeolites from natural clinker on a laboratory scale via two fusion methods and two aging methods is carried out. Several parameters were selected: the alkaline activator/coal by-product ratio for a fusion of 1.2; fusion temperature and time, 800 °C and 2 h respectively; and the H<sub>2</sub>O/alkali fused coal by-product ratio = 5 mL/g. The variables were: state of the pre-fusion alkali (solid or liquid); aging method (ultrasonic or static); and aging and reaction times (6,12,24). This study sets the conditions for future synthesis of better and more abundant zeolitic materials from a low-value material.

## 2. Experimental procedure

### 2.1. Materials

The starting material used for the synthesis of zeolites was supplied as follows: Natural clinker associated with the spontaneous combustion of coal seams from a late Paleocene formation, which was collected from an open field of Punto Tajo located in Colombia at a latitude of 10°59'09.9'' N and a longitude of 72°43'07.59'' W and an altitude (MSL) of 108.691m. It was prepared prior to synthesis, using the following steps: rough crushing with a Retsch Jaw Crusher BB 200 to ~ 2mm, milling with a Retsch RM100 mortar grinder mill to clay particle size, and sieving with a 200 mesh Ro-Tap sieve shaker; 63 mm particles selected for zeolite synthesis. The reagents used to activate this coal by-product was sodium hydroxide, NaOH, as pellets (97%, from Carlo Erba Reagents), and distilled water using standard purification methods.

### 2.2. Zeolite synthesis

The synthesis of zeolites developed using two types of alkaline fusions prior to two aging methods and the hydrothermal treatment. Optimal conditions for the synthesis of zeolites from coal by-products with a maximum value of cation exchange capacity are a coal by-product/alkaline activator ratio of 1:1.2 [17–18]. Therefore, alkali hydroxide powder was mixed with natural clinker using two methods, one with dry alkali and the other with alkali dissolved in water forming a saturated solution. The resultant mixture calcined at 800 °C for 2 h. The alkaline reagent added to the starting material acts as an activator agent during fusion. The alkali-fused products were then dissolved in water (H<sub>2</sub>O/alkali fused starting material ratio = 5 mL/g), under stirring conditions for 30 minutes with a speed of 600 RPM in a VELP Scientifica magnetic stirrer until the reaction gels were homogenized and were then aged for 6, 12 and 24 hours under static and ultrasonic conditions. The mixtures transferred into 65 ml polytetrafluoroethylene (PTFE) bottles and then crystallized under static conditions at 80 °C for 6, 12 and 24 h. After that, the obtained zeolite was filtered and washed with distilled water. Finally, the product was dried at 60°C for two hours.

### 2.3. Characterization

The X-ray diffraction patterns of the raw materials and synthesized products were recorded in a BRUKER D8 ADVANCE diffractometer operating in Da Vinci geometry equipped with an X-ray tube (Cu-Kα1 radiation:  $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ , 40 kV and 30 mA) using a nickel filter and a 1-dimensional LynxEye detector. A fixed antiscatter slit of 8 mm, receiving slit (RS) of 1 mm, soller slits of (SS) of 2.5° and a detector slit of 0.6 mm were used. Data collection was carried out in the 2 $\theta$  range of 3.5–70°, with a step size of 0.01526° (2 $\theta$ ) and had a counting time of 0.4 s/step. Phase identification performed using the crystallographic database Powder Diffraction File (PDF-2) from the International Centre for Diffraction Data (ICDD). The morphology of the raw materials and synthesized zeolites was examined by scanning electron microscopy (FEG Quanta 650), under the following analytical conditions: magnification = 1000–20000x, WD = 7.0–11.0 mm, HV = 10 kV, signal = SE and Z CONT, detector = BSED and ETD. The existence of a zeotype framework was confirmed by Fourier transform infrared spectroscopy in the 4000–400 cm<sup>-1</sup> region by using a BRUKER TENSOR 27 spectrometer at 20°C and applying 30 scans per sample. However, only the 1250–400 cm<sup>-1</sup> region was discussed, because this is where the spectra showed remarkable changes. A BRUKER ATR PLATINUM cell used.

## 3. Results and discussion

### 3.1. Chemical and mineralogical analyses of natural clinker

According to Ríos et al. [2] natural clinker presents appropriate SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratios to be used as starting materials for the synthesis of zeolitic materials with a high cation exchange capacity and high crystallinity. SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratios are important for predicting the success in the process of zeolite synthesis, although it is also important to consider the occurrence of impurities in the starting material [28]. According to Ríos and co-workers [2,27–29], the chemical composition of the raw natural clinker displays variations of up to 15 wt% among its major oxides (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, and CaO), which probably reflects local heterogeneity related to small changes in the original sedimentary rock. Natural clinker has very high contents of SiO<sub>2</sub> (68.15%) and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (19.44%) with a SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratio = 3.5. Natural clinker shows very low contents of Ca and S, and a high content of Fe associated with the presence of hematite, which is very important taking into account that Fe-bearing minerals, mainly magnetite, can show an inert behavior, and Ca-bearing phases can act as a zeolite synthesis inhibitor through the formation of calcium silicate hydrate phases [9]. A qualitative X-ray diffraction analysis was useful in identifying the crystalline phases of natural clinker using the International Centre for Diffraction Data's (ICDD) PDF-2. Table 1 summarizes this.

Table 1.

Qualitative X-ray diffraction analysis of natural clinker.

| Crystalline phase                                                                                                | PDF-2 Card Number | Mineral        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|----------------|
| SiO <sub>2</sub>                                                                                                 | 010-79-1910       | Quartz (Qtz)   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                                                                   | 010-89-0599       | Hematite (Hem) |
| TiO <sub>2</sub>                                                                                                 | 010-75-6234       | Rutile         |
| CaCO <sub>3</sub>                                                                                                | 010-85-1108       | Calcite        |
| Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>                                                                                   | 010-72-8152       | Magnetite      |
| (Na,Ca) <sub>0.3</sub> Al <sub>2</sub> (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> ·xH <sub>2</sub> O | 000-58-2021       | Beidellite     |
| Na <sub>0.3</sub> Fe <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O           | 000-29-1497       | Nontronite     |

Source: The authors.

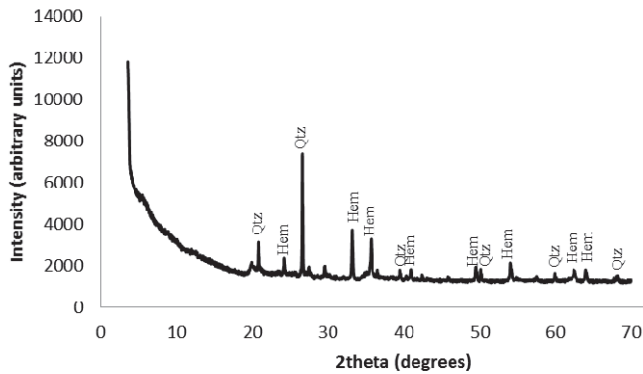


Figure 1. X-ray diffraction pattern of natural clinker.

Source: The authors.

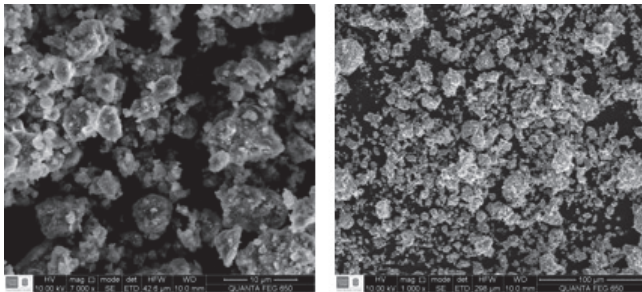


Figure 2. Scanning electron microscopy images of natural clinker with a zoom of (a) 7000x, and (b) 1000x.

Source: The authors.

Fig. 1 illustrates the X-ray diffraction for natural clinker. It can be seen that the major crystalline phases found in this geomaterial are quartz and hematite.

Scanning electron microscopy images of natural clinker (Fig. 2) reveal a roundish agglomerated type surface. Scanning electron microscopy was also used for making a quantitative elemental analysis in back-scattered electrons mode. The EDS spectrum (not shown in this study) of natural clinker reveals that it mainly consists of O, Al, Si, and Fe elements, with minor Mg, Ca, and K. The mass ratios of O:Si:Al:Fe were 30.31:36.56:18.96:6.57.

The morphology of the synthesized zeolites revealed by scanning electron microscopy micrographs was studied in order to choose the zeolites with the most abundant crystalline phases. It was discovered that the morphology was richer and more crystalline phases were obtained when solid clinker-solid NaOH fusion was carried out and the aging method was static.

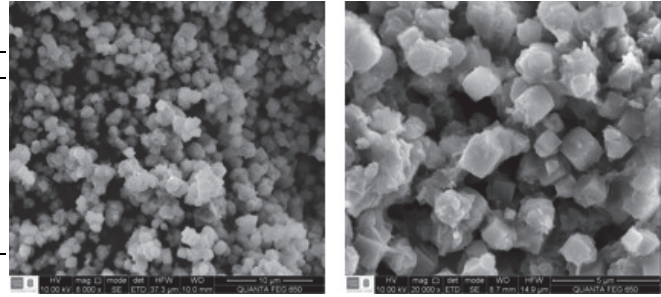


Figure 3. Scanning electron microscopy micrographs of zeolites from solid natural clinker and solid NaOH aged under static conditions for 6 hours and undergoing hydrothermal treatment for 24 hours. (a) 8000x, and (b) 20000x

Source: The authors.

Table 2.

Crystalline phases identified by X-ray diffraction using solid fusion and static aging.

| Hydrothermal treatment time [hours] | 6                              | 12                               | 24                                                 |
|-------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------|
| 6 hours of static aging             | Faujasite, LTA Zeolite, Quartz | Sodalite, Faujasite, LTA zeolite | Sodalite, Faujasite, LTA zeolite, Quartz, Vaterite |

Source: The authors.

### 3.2. Zeolites from fusion of solid clinker and solid sodium hydroxide

The main as-synthesized zeolites obtained by this type of alkaline fusion include: faujasite, sodalite, NaA (LTA) zeolite, and vaterite. The synthesis of these zeolites was investigated by the evaluation of some parameters affecting their formation process, such as the aging method (static or ultrasonic), and the hydrothermal reaction time (6, 12, and 24 hours), and under static conditions during the synthesis process.

#### 3.2.1. Microstructural analysis

Scanning electron microscopy micrographs showed that six hours of static aging and the longest chosen period of hydrothermal treatment (24 hours) produced more diversity and a higher quality of zeolites. Thus, the best results are in the zeolite produced under 6 hours of static aging and the longest hydrothermal treatment period in this study. Fig. 3 shows how diverse are the morphology and the crystalline phases of this sample.

#### 3.2.2. Identification of crystalline phases

Table 2 depicts the results of X-ray diffraction analyses, with the crystalline phases obtained after using solid fusion and static aging.

Fig. 4 presents the X-ray diffraction patterns of the activated natural clinker, which show that faujasite was the major crystalline phase present in the synthesis products. The content of this zeolitic material increased with reaction time, with the highest synthesis yields obtained after 24 hours, with quartz partially dissolved under these experimental conditions. Results show that the conversion of natural

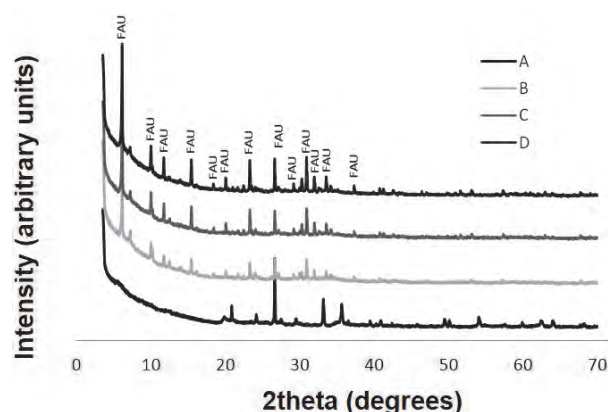


Figure 4. X-ray diffraction patterns of (A) natural clinker and zeolites, mainly sodalite, with (B) 6, (C) 12 and (D) 24 hours of hydrothermal treatment.

Source: The authors.

clinker was efficient during the synthesis process, and that through the proposed method that was described above, it was possible to transform it into zeolite-like materials, with faujasite as the most abundant phase.

### 3.2.3. Fourier transformed infrared spectroscopy

The Fourier transformed infrared spectroscopy spectra of the raw material (natural clinker) and zeolitic materials that were synthesized in static aging for 6 hours and that have different hydrothermal reaction times are illustrated in Fig. 5. The spectrum for natural clinker shows its three wide characteristic bands at 449  $\text{cm}^{-1}$  (T-O bending vibrations), 701  $\text{cm}^{-1}$  (T-O symmetric stretching vibrations) and 1001  $\text{cm}^{-1}$  (T-O asymmetric stretching vibrations). Typical bands of zeolitic materials appear, including T-O bond (T=Al or Si) in the region of 950-1250  $\text{cm}^{-1}$  and the T-O symmetrical stretching in the region of 660-770  $\text{cm}^{-1}$ . Bands in the region of 500-650  $\text{cm}^{-1}$  are attributed to the presence of double rings (D4R and D6R) in the structure of the zeolitic materials. Moreover, bands in the region of 400-250  $\text{cm}^{-1}$  represent internal vibrations of T-O, while bands in the region of 300-420  $\text{cm}^{-1}$  can be attributed to pore opening. Similar results are reported by Ríos and Williams [18].

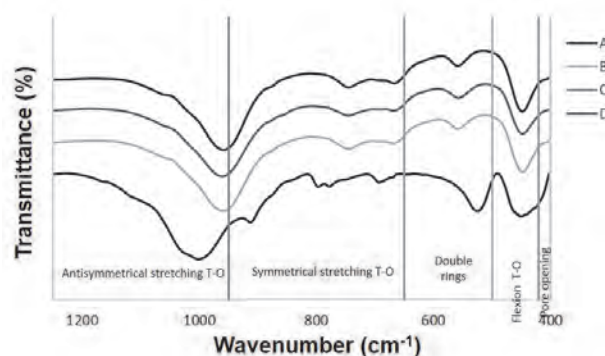


Figure 5. Fourier transformed infrared spectra of (A) natural clinker and zeolites with (B) 6, (C) 12 and (D) 24 hours of hydrothermal treatment.

Source: The authors.

Table 3.

Fourier transformed infrared spectroscopy frequencies for natural clinker and its zeolitic products synthesized in static aging for 6 hours and at different hydrothermal reaction times.

| Frequency ( $\text{cm}^{-1}$ )      | Asymmetrical stretching <sup>a</sup> | Symmetrical stretching <sup>a</sup> | Double rings <sup>b</sup> | Internal vibrations of T-O |
|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| Natural clinker                     | 1001                                 | 701                                 |                           | 449                        |
| 6 hours of hydrothermal reaction    | 962                                  | 744                                 | 669-557                   | 447                        |
| 12 hours of hydrothermal reaction   | 960                                  | 746                                 | 667                       | 447                        |
| 24 hours of hydrothermal reaction H | 958                                  | 742                                 | 667                       | 447                        |

<sup>a</sup> Al-O in the structure Si-O-A

<sup>b</sup> parallel rings of 6 members

Source: The authors.

These results reveal that, in general, the characteristic frequencies of natural clinker shifted to lower frequencies, although without significantly changing with reaction time.

Table 3 summarizes the characteristic Fourier transformed infrared frequencies obtained for the natural clinker and zeolitic materials.

### 3.3. Zeolites from fusion of solid clinker and sodium hydroxide in aqueous solution

According to the results obtained by Oviedo et al. [30] the main as-synthesized zeolites obtained by the alkaline fusion followed by the hydrothermal reaction method include: sodalite, faujasite, and zeolite P1. The synthesis of these zeolites was investigated by the evaluation of some parameters affecting their formation process, such as the aging method (static or ultrasonic), and the hydrothermal reaction time (6, 12, and 24 hours).

#### 3.3.1. Microstructural analysis

Scanning electron microscopy micrographs showed that in this case, the zeolites synthesized during 12 hours of static aging and 24 hours of hydrothermal treatment present a poor morphology and four crystalline phases, which is good compared to other synthesized solid clinker- aqueous NaOH fusions. Fig. 6 shows the morphology of this sample.

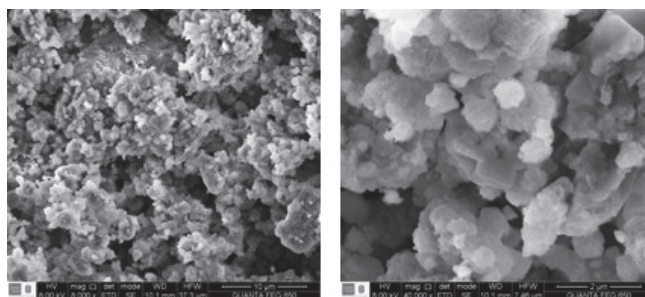


Figure 6. Scanning electron microscopy micrographs of zeolites from solid natural clinker and aqueous NaOH aged under static conditions for 12 hours and undergoing hydrothermal treatment for 24 hours. (a) 8000x, and (b) 40000x.

Source: The authors.

Table 4.

Crystalline phases identified by X-ray diffraction using solid natural clinker-aqueous NaOH fusion.

| Hydrothermal treatment time [hours] | 6                                                                                                                 | 12                                                          | 24                                                                                                       |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 12 hours of static aging            | Sodalite $\text{Na}_8(\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24})$ ; Sodalite $\text{Na}_8(\text{AlSiO}_4)_6\text{Cl}_2$ | Sodalite $\text{Na}_8(\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24})$ | Sodalite $\text{Na}_8(\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24})$ ; Faujasite; Calcite; Sodium aluminosilicate |

Source: The authors.

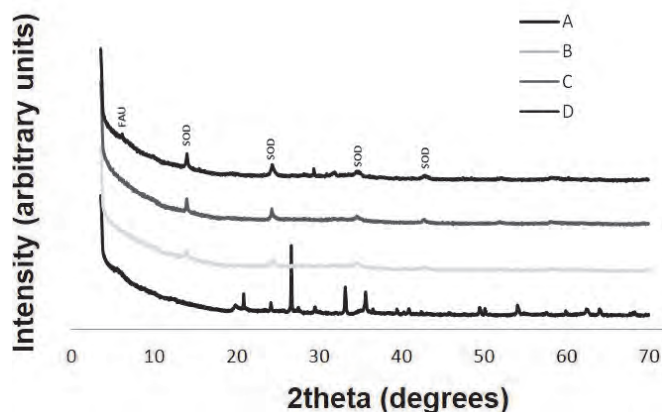


Figure 7. X-ray diffraction patterns of (A) natural clinker and the synthesized zeolites after (B) 6, (C) 12 and (D) 24 hours of hydrothermal treatment.

Source: The authors.

### 3.3.2. Identification of crystalline phases

Table 4 depicts the results of X-ray diffraction analyses, with the crystalline phases obtained after using solid natural clinker-aqueous NaOH fusion. Two types of sodalite were obtained in the first 6 hours of hydrothermal treatment; however, only the sodalite  $\text{Na}_8(\text{AlSiO}_4)_6\text{Cl}_{24}$  was obtained after 12 hours. After 24 hours, it crystallized along with faujasite, calcite, and sodium aluminosilicate.

Fig. 7 presents the X-ray diffraction patterns of the activated natural clinker, which show that sodalite was the major crystalline phase present in the synthesis products. The content of this zeolitic material increased with reaction time, with the highest synthesis yields obtained after 24 hours, although it crystallized as a single phase or along with other crystalline phases. Quartz was totally dissolved under these experimental conditions. The conversion of natural clinker was more efficient compared with that observed in the previous method during the synthesis process, and, therefore, the synthesis of zeolite-like materials was successful by the proposed method described above, with sodalite as the most abundant phase.

According to the analysis of X-ray diffraction data, at 24 hours of hydrothermal treatment four crystalline phases were obtained, the most abundant phase was faujasite, which at the same time is the most crystalline one. Sodalite is present in all the synthesized zeolites, and the highest proportion is in the one which had the longest time for hydrothermal treatment.

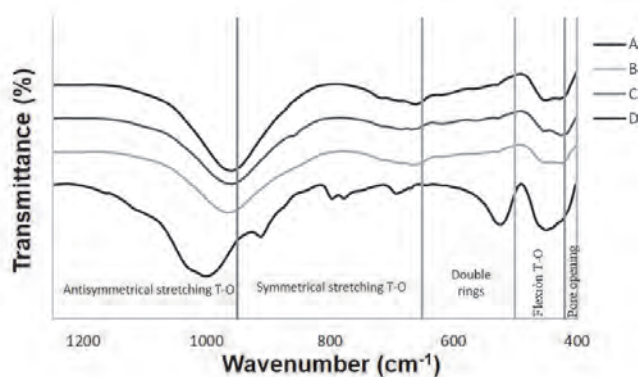


Figure 8. Fourier transformed infrared spectra of natural clinker (A) and zeolites after (B) 6, (C) 12 and (D) 24 hours of hydrothermal treatment.

Source: The authors.

Table 5.

Fourier transformed infrared spectroscopy frequencies for natural clinker and its zeolitic products synthesized in static aging for 12 hours and with different hydrothermal reaction times.

| Frequency ( $\text{cm}^{-1}$ )    | Asymmetrical stretching <sup>a</sup> | Symmetrical stretching <sup>a</sup> | Double rings <sup>b</sup> | Internal vibrations of T-O |
|-----------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| Natural clinker                   | 1001                                 | 701                                 |                           | 449                        |
| 6 hours of hydrothermal reaction  | 964.37                               | 732                                 | 663.49                    | 426                        |
| 12 hours of hydrothermal reaction | 960.51                               | 734                                 | 669                       | 426                        |
| 24 hours of hydrothermal reaction | 960.51                               | 734                                 | 663                       | 430                        |

<sup>a</sup> Al-O in the structure Si-O-A

<sup>b</sup> parallel rings of 6 members

Source: The authors.

### 3.3.3. Fourier transformed infrared spectroscopy

The Fourier transformed infrared spectroscopy spectra of the raw material (natural clinker) and zeolitic materials are illustrated in Fig. 8. The spectrum for natural clinker shows its three wide characteristic bands (at 449, 701 and  $1001 \text{ cm}^{-1}$ ). Characteristic bands of zeolites, including the T-O bond in the region of  $950\text{--}1250 \text{ cm}^{-1}$  and T-O symmetrical stretching in the region of  $660\text{--}770 \text{ cm}^{-1}$  were also observed. Bands in the region of  $500\text{--}650 \text{ cm}^{-1}$  are attributed to the presence of double rings in the zeolite framework. Furthermore, bands in the region of  $400\text{--}250 \text{ cm}^{-1}$  represent internal vibrations of T-O while bands in the region of  $300\text{--}420 \text{ cm}^{-1}$  can be attributed to pore opening.

These results reveal that, in general, the characteristic frequencies of natural clinker shifted to lower frequencies, although without significantly changing with reaction time.

Table 5 depicts the characteristic Fourier transformed infrared frequencies obtained for the natural clinker and zeolitic materials.

A shorter aging time of the hydrogel well-crystallized zeolites formed, whereas aging the hydrogel under longer aging conditions produced poor-crystallized products. In general, results show that sodium hydroxide as an activating agent was efficient in the hydrothermal conversion of natural clinker, similar to what has been reported by Rios

and co-workers [18,27-29]. Recently, Henao and co-workers (personal communication) have been undertaking research on the study of several synthesis parameters on the transformation of natural clinker using aluminum wastes as  $Al_2O_3$  source, with the production of zeolites Linde Type A and faujasite.

#### 4. Conclusions

Two fusion and aging methods were studied to synthesize zeolites from Colombian natural clinker. The most abundant crystalline phases were obtained from the fusion of solid alkali and solid clinker, specially the one which took 6 hours of static aging and 24 hours of hydrothermal treatment. This synthesis also showed good results with the alkaline activation of solid clinker and aqueous NaOH obtaining sodalite as a primary phase, with an aging time of 12 hours and a hydrothermal treatment of 24 hours. Aging under ultrasonic conditions in both kinds of fusion methods was counter-productive because the obtained phases were less than the ones that were obtained under static conditions. Therefore, it is concluded that the ultrasonic waves impede the crystallization process. Results from this study reveal the transformation of natural clinker in several synthetic zeotypes with strong similarities compared with previous studies using natural clinker as a starting material in the synthesis of zeolites. A modification of the aging conditions, using an ultrasonic batch, is highlighted here, which can be performed to improve knowledge on the process of nucleation and the crystallization of zeolites. However, further studies should be carried out under well-optimized experimental conditions to successfully prepare highly crystalline zeolites.

#### Acknowledgments

Authors gratefully acknowledge the Vicerrectoría de Investigación y Extensión of the Universidad Industrial de Santander for financial support through Research Project No. 5454 "Síntesis de zeolitas a partir de residuos sólidos de la industria nacional del carbón para la eliminación de cromo (Cr) de efluentes de industriales". This research forms part of L.F. Ávila and J.A. Lizcano's undergraduate thesis at the Universidad Industrial de Santander. Thanks to the Universidad Industrial de Santander for the use of research facilities (X-ray diffraction, Fourier transformed infrared spectroscopy, and scanning electron microscopy) and the Laboratorio de Consultas Industriales, as well as their human resources. The authors also acknowledge the anonymous referees for their critical and insightful reading of the manuscript and are most grateful to the above-named people and institutions for their support.

#### References

- [1] Höller, H. and Barth-Wirsching, U., Zeolite formation from fly ash. *Fortschritte der Mineralogie*, 63, pp. 21-43, 1985.
- [2] Rios, C.A., Williams, C.D. and Castellanos, O.M., Synthesis and characterization of zeolites by alkaline activation of kaolinite and industrial by-products (fly ash and natural clinker). *Bistua*, 4, pp. 60-71, 2006.
- [3] Mondragón, F., Rincón, F., Sierra, L., Escobar, J., Ramírez, J. and Fernández, J., New perspectives for coal ash utilization: Synthesis of zeolitic materials. *Fuel*, 69, pp. 263-266, 1990. DOI: 10.1016/0016-2361(90)90187-U
- [4] Kolousek, D., Seidl, V., Prochazkova, E., Obsasnikova, J., Kubelkova, L. and Svetlik, L., Ecological utilization of power-plant fly ashes by their alteration to phillipsite: hydrothermal alteration, application. *Acta Universitatis Carolinae Geologica*, 37, pp. 167-178, 1993.
- [5] Lin, C.-F. and His, H.-C., Resource recovery of waste fly ash: Synthesis of zeolite-like materials. *Environmental Science and Technology*, 29, pp. 1109-1117, 1995. DOI: 10.1021/es00004a033
- [6] Park, M. and Choi, J., Synthesis of phillipsite from fly ash. *Clay Sciences*, 9, pp. 219-229, 1995.
- [7] Shih, W.-H., Chang, H.-L. and Shen, Z., Conversion of class-F fly ash to zeolites. *Materials Research Society Symposium Proceedings*, 371, pp. 39-44, 1995.
- [8] Amrhein, C., Haghnia, G.H., Kim, T.S., Mosher, P.A., Gagajena, R.C., Amanios, T. and De La Torre, L., Synthesis and properties of zeolites from fly ash. *Environmental Science and Technology*, 30, pp. 735-742, 1996. DOI: 10.1021/es940482c
- [9] Querol, X., Plana, F., Alastuey, A. and Lopez-Soler, A., Synthesis of Na-zeolites from fly ash. *Fuel*, 76, pp. 793-799, 1997. DOI: 10.1016/S0016-2361(96)00188-3
- [10] Rayalu, S., Meshram, S.U. and Hasan, M.Z., Highly crystalline faujasitic zeolites from fly ash. *Journal of Hazardous Materials*, 77, pp. 123-131, 2000. DOI: 10.1016/S0304-3894(00)00212-0
- [11] Querol, X., Moreno, N., Umaña, J.C., Alastuey, A., Hernández, E., López-Soler, A. and Plana, F., Synthesis of zeolites from fly ash: An overview. *International Journal of Coal Geology*, 50, pp. 413-423, 2002. DOI: 10.1016/S0166-5162(02)00124-6
- [12] Murayama, N., Yamamoto, H. and Shibata, J., Mechanism of zeolite synthesis from coal fly ash by alkali hydrothermal reaction. *International Journal of Mineral Processing*, 64, pp. 1-17, 2002. DOI: 10.1016/S0301-7516(01)00046-1
- [13] Mouhtaris, Th., Charistos, D., Kantiranis, N., Filippidis, A., Kassoli-Fournaraki, A. and Tsirambidis, A., GIS-type zeolite synthesis from Greek lignite sulphocalcic fly ash promoted by NaOH solutions. *Microporous and Mesoporous Materials*, 61, pp. 57-67, 2003. DOI: 10.1016/S1387-1811(03)00355-X
- [14] Ojha, K., Pradhan, N.C. and Samanta, A.N., Zeolite from fly ash: Synthesis and characterization. *Bulletin of Materials Science*, 27, pp. 555-564, 2004. DOI: 10.1007/BF02707285
- [15] Inada, M., Eguchi, Y., Enomoto, N. and Hojo, J., Synthesis of zeolite from coal ashes with different silica-alumina composition. *Fuel*, 84, pp. 299-304, 2005. DOI: 10.1016/j.fuel.2004.08.012
- [16] Rios, C.A., Williams, C.D. and Roberts, C.L., A comparative study of two methods for the synthesis of fly ash-based sodium and potassium type zeolites with potential use in the purification of wastewaters. *Fuel*, 88, pp. 1403-1416, 2009. DOI: 10.1016/j.fuel.2009.02.012
- [17] Shigemoto, N., Hayashi, H. and Miyauchi, K., Selective formation of Na-X zeolite from fly ash by fusion with sodium hydroxide prior to hydrothermal reaction. *Journal of Material Sciences*, 28, pp. 4781-4786, 1993. DOI: 10.1007/BF00414272
- [18] Rios, C.A. and Williams, C.D., Synthesis of zeolitic materials from natural clinker: A new alternative for recycling coal combustion by-products. *Fuel*, 87, pp. 2482-2492, 2008. DOI: 10.1016/j.fuel.2008.03.014
- [19] Querol, X., Plana, F., Alastuey, A., Lopez-Soler, A., Andres, J.M., Juan, R., Ferrer, P. and Ruiz, C.R., A fast method of recycling fly ash: Microwave assisted zeolite synthesis. *Environmental Science and Technology*, 31, pp. 2527-2532, 1997. DOI: 10.1021/es960937t
- [20] Park, M., Choi, C.-L., Lim, W.-T., Kim, M.-C., Choi, J. and Heo, N.-H., Molten-salt method for the synthesis of zeolitic materials: I. Zeolite formation in alkaline molten-salt system. *Microporous and Mesoporous Materials*, 37, pp. 81-89, 2000. DOI: 10.1016/S1387-1811(99)00195-X, DOI: 10.1016/S1387-1811(99)00196-1
- [21] Park, M., Choi, C.-L., Lim, W.-T., Kim, M.-C., Choi, J. and Heo, N.-H., Molten-salt method for the synthesis of zeolitic materials: II. Characterization of zeolitic materials. *Microporous and Mesoporous Materials*, 37, pp. 91-98, 2000. DOI: 10.1016/S1387-1811(99)00195-X, DOI: 10.1016/S1387-1811(99)00196-1

- [22] Hollman, G.G., Steenbruggen, G., and Janssen-Jurkovičová, M., A two-step process for the synthesis of zeolites from coal fly ash. *Fuel*, 78, pp. 1225-1230, 1999. DOI: 10.1016/S0016-2361(99)00030-7
- [23] Moreno, N., Querol, X., Andrés, J.M., López-Soler, A., Janssen-Jurkovičová, M., Nugteren, H., Towler, M. and Stanton, K., Determining suitability of a fly ash for silica extraction and zeolite synthesis. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 79, pp. 1009-1018, 2004. DOI: 10.1002/jctb.1088
- [24] Moreno, N., Querol, X., Ayora, C., Fernández-Pereira, C. and Janssen-Jurkovičová, M., Utilisation of zeolites synthesized from fly ash for the purification of acid mine waters. *Environmental Science and Technology*, 35, pp. 3526-3534, 2001. DOI: 10.1021/es0002924
- [25] Moreno, N., Querol, X., Ayora, C., Alastuey, A., Fernández-Pereira, C. and Janssen-Jurkovičová, M., Potential environmental applications of pure zeolitic material synthesized from fly ash. *Journal of Environmental Engineering*, 127, pp. 994-1002, 2001. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(2001)127:11(994)
- [26] Querol, X., Moreno, N., Umaña, J.C., Juan, R., Hernández, S., Fernández-Pereira, C., Ayora, C., Janssen-Jurkovičová, M., García-Martínez, J., Linares-Solano, A. and Cazorla-Amoros, D., Application of zeolitic material synthesized from fly ash to the decontamination of waste water and flue gas. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 77, pp. 292-298, 2002. DOI: 10.1002/jctb.597
- [27] Ríos, C.A., Williams, C.D. and Roberts C.L., Removal of heavy metals from acid mine drainage (AMD) using coal fly ash, natural clinker and synthetic zeolites. *Journal of Hazardous Materials*, 156, pp. 23-35, 2008. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.11.123
- [28] Ríos, C.A., Synthesis of zeolites from geological materials and industrial wastes for potential application in environmental problems. PhD Thesis, University of Wolverhampton, United Kingdom, 2008.
- [29] Sandoval, M.V., Henao, J.A., Ríos, C.A., Williams, C.D. and Apperley, D.C., Synthesis and characterization of zeotype ANA framework by hydrothermal reaction of natural clinker. *Fuel*, 88, pp. 272-281, 2009. DOI: 10.1016/j.fuel.2008.08.017
- [30] Oviedo, J.A., Henao, J.A. and Ríos, C.A., A comparative study on conversion of industrial coal by-products in low SiO<sub>2</sub> zeolite of faujasite type. *DYNA*, 79 (176), pp. 105-114, 2012.

**J.A. Lizcano-Cabeza**, received his BSc. in Chemistry in 2013 from the Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. He performed experimental work on the use of coal industry by-products in the synthesis of zeolitic materials using different methods. Currently, he is working as a private consultant.

**L.F. Ávila-Ascanio**, received his BSc. in Chemistry in 2013 from the Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. He performed experimental work on the use of coal industry by-products in the synthesis of zeolitic materials by different methods. Currently, he is working as a private consultant.

**C.A. Ríos-Reyes**, received his BSc. in Geology in 1989 and his Postgraduate Diploma in University Teaching in 1995 from the Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. The Shimane University, Matsue, Japan, conferred his MSc. in Geology in 1999. The University of Wolverhampton, Wolverhampton, England, conferred his PhD in Applied Sciences in 2008. He has been working as a full-time lecturer of the School of Geology at Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia since 1992, where he has developed his professional experience teaching at a University level over the last 22 years in the field of mineralogy. He has also undertaken much fieldwork in crystalline basement complexes in different areas of Colombia. Over the last six years he has focused his research interests on the use of low-cost raw materials with potential application in the mitigation of environmental problems. Currently, he is the director of the Research Group in Basic and Applied Geology at the School of Geology of the Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia and the director of the Microscopy Laboratory of the Guatiguará Technological Park.

**L.Y. Vargas-Fiallo**, received her BSc. in Chemistry in 1980, her Postgraduate Diploma in Environmental Chemistry in 1990, and her MSc. in Analytical Chemistry in 2000, all of them from the Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. She has been working as a full-time lecturer in the School of Chemistry at Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia since 1980, when she received her professional degree. Currently she is the director of the Industrial Consulting Laboratory of the Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia which bases its work on undertaking monitoring for the characterization of domestic and industrial wastewater analysis, working both in situ and in industry laboratories.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN

FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería  
Geológica e Ingeniería de Minas y Metalurgia

Oferta de Posgrados

Especialización en Materiales y Procesos  
Maestría en Ingeniería - Materiales y Procesos  
Maestría en Ingeniería - Recursos Minerales  
Doctorado en Ingeniería - Ciencia y Tecnología de  
Materiales

Mayor información:

E-mail: [acgeomin\\_med@unal.edu.co](mailto:acgeomin_med@unal.edu.co)

Teléfono: (57-4) 425 53 68

## Implementation of computing with words in evaluating training program

Gerardo Felix-Benjamín <sup>a</sup>, Claudia Calero-Muela <sup>b</sup>, Renier Esquivel-García <sup>c</sup> & Rafael Bello-Pérez <sup>d</sup>

<sup>a</sup> Centro de Estudios Informáticos, Universidad “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara, Cuba. [gerardfelix87@gmail.com](mailto:gerardfelix87@gmail.com)

<sup>b</sup> Empresa de Construcción y Montaje, Sancti Spiritus, Cuba. [claudia@gecss.co.cu](mailto:claudia@gecss.co.cu)

<sup>c</sup> Dirección de Capital Humano, Universidad de Sancti Spiritus “José Martí Pérez, Sancti Spiritus, Cuba. [renieresquivel@yahoo.es](mailto:renieresquivel@yahoo.es)

<sup>d</sup> Director Centro de Estudios Informáticos, Universidad “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara, Cuba. [rbellop@uclv.edu.cu](mailto:rbellop@uclv.edu.cu)

Received: July 23<sup>th</sup>, 2014. Received in revised form: March 14<sup>th</sup>, 2015. Accepted: September 21<sup>th</sup>, 2015.

### Abstract

The decision-making problems have attracted the attention of many researchers in a wide range of disciplines. The decision situations in which multiple individuals involved, each with their own knowledge about alternatives of the decision problem requires advanced to deal with this difficulty techniques. This work evaluates the impact of training received by a group of workers in the assessments are modeled using different kinds of information provided by different groups of experts to manage the uncertainty and subjectivity of such assessments for there to infer its relationship with the training received. Therefore, it is necessary and appropriate to establish a framework adapted to the heterogeneous nature of these criteria. Model and manage uncertainty has been successful and involves making computing processes with words hence the model 2-tuples linguistic representation is offered as a solution for their accuracy, ease of information management in complex frameworks, as to give greater interpretability of the resulting data.

**Keywords:** Computing with words; group decision making; decision analysis; impact of training.

## Aplicación de la computación con palabras en la evaluación del impacto de la capacitación

### Resumen

Los problemas de toma de decisiones han llamado la atención de muchos investigadores en una amplia gama de disciplinas. Las situaciones de decisión en las que participan múltiples individuos, cada uno con su propio conocimiento acerca de las alternativas del problema de decisión, requiere de técnicas avanzadas para lidiar con esta dificultad. Este trabajo pretende evaluar el impacto de la capacitación recibida por un grupo de trabajadores en el que las evaluaciones se modelan mediante información de distinta naturaleza proporcionada por diferentes grupos de expertos con el fin de gestionar la incertidumbre y subjetividad de tales valoraciones para de ahí poder inferir su relación con la capacitación recibida. Por lo tanto, se hace necesario y conveniente establecer un marco heterogéneo adaptado a la naturaleza de tales criterios. Modelar y gestionar la incertidumbre ha dado buenos resultados e implica la realización de procesos de computación con palabras de ahí que el modelo de representación lingüística 2-tuplas se ofrezca como solución por su precisión, facilidad en el manejo de la información en marcos complejos, así como por dar una mayor interpretabilidad a los datos resultantes.

**Palabras clave:** Computación con palabras; toma de decisiones grupales; análisis de decisión; impacto de la capacitación.

### 1. Introducción

El entorno empresarial actual se caracteriza por el desarrollo de la información y la gestión del conocimiento [1], donde los problemas de toma de decisiones con múltiples expertos o múltiples criterios como problemas de toma de

decisiones grupales (GDM), en el que cada experto expresa su/sus valoraciones dependiendo de la naturaleza de las alternativas y su propio conocimiento acerca de las mismas son una herramienta clave para que las empresas proporcionen información sobre el rendimiento de los trabajadores con el fin de realizar ajustes salariales,

promociones, identificar necesidades de capacitación y desarrollo [2]. Estos problemas representan un importante campo de investigación en las ciencias administrativas, ciencia de la decisión y en investigación operacional, ya que los expertos pueden provenir de diferentes áreas de conocimiento, con distinta experiencia y utilizar diferentes juicios y métodos de evaluación, donde la información proporcionada por los mismos puede ser no sólo vaga o con incertidumbre, sino que presente distinta naturaleza, incluyendo etiquetas lingüísticas con múltiple granularidad, números difusos, intervalos numéricos y números reales[3], llamados en la literatura como problemas heterogéneos.

Cuando las alternativas son medibles por su naturaleza cuantitativa son evaluadas por medio de valores numéricos precisos con la ayuda de la lógica difusa [4-6]. Sin embargo, cuando las alternativas están relacionadas con aspectos cualitativos puede ser difícil de calificar utilizando valores precisos porque usualmente, este conocimiento es no preciso y presenta incertidumbre [7], por lo que debido a tales situaciones, un enfoque lingüístico difuso se puede utilizar para obtener una mejor solución[5,8].

Sin embargo, la mayoría de las propuestas de resolución de problemas GDM con múltiples expertos se centran en los casos en que todos los expertos expresan sus opiniones por medio de valores del mismo tipo [7], ya sea valores reales, valores de intervalo o etiquetas lingüísticas en el mismo conjunto de términos lingüísticos, es decir, procesos de evaluación que se definen en un marco de evaluación estricta que sólo tiene en cuenta un único tipo de dominio de expresión, a pesar de que los criterios evaluados pueden tener distinta naturaleza y podrían adoptar diferentes tipos de dominios de expresión y como consecuencia, las evaluaciones recogidas no permitirían recoger la riqueza de la información expresada. Esto trae consigo que los resultados finales sean difíciles de interpretar de forma correcta. Las evaluaciones cuantitativas no siempre representan la información cualitativa de una manera precisa[2]. Por lo tanto, el uso de la información heterogénea en problemas de decisión con múltiples expertos no es una situación inusual [9-11], con propuestas que combinan diferentes tipos de información [12], lo que demuestra la aplicabilidad de esta teoría a problemas prácticos del mundo real. La lógica difusa y el enfoque lingüístico difuso proporcionan herramientas para modelar y gestionar la incertidumbre por medio de variables lingüísticas, proporcionando resultados confiables [13,14].

El principal problema para hacer frente a contextos heterogéneos es el de la fase de agregación y radica en como agregar este tipo de información, ya que no existen operadores estándar para combinar cualquier tipo de información heterogénea [7], por lo que [7] propuso un método llamado conjunto de términos lingüísticos básicos (BLTS), el cual unifica la información heterogénea de entrada en un único dominio, lo que es imprescindible para dar solución a problemas de este tipo porque permite manejar información lingüística, intervalos numéricos, información lingüística multi-granular, números reales, mediante un proceso de agregación que combina este tipo de información a un formato común. También se utilizará una extensión muy útil de los BLTS llamado modelo de representación

lingüística 2-tuplas [13,15] y su enfoque ampliado para hacer frente a la información heterogénea [7] para obtener resultados lingüísticos más completos y aún más cerca del modelo cognitivo humano, donde la escala ya no es puramente ordinal, pero aun así el procesamiento de la información lingüística se realiza directamente en las etiquetas, lo que ha mostrado ser una buena opción para gestionar la información heterogénea [16,17]. Con este modelo de representación lingüística se evita la distorsión, la pérdida de información en el procesamiento de la información lingüística [18] y ha sido examinado como aplicado en problemas de toma de decisiones [19-23].

Para llevar a cabo este análisis también se requiere de un proceso de computación con palabras (CWW) [24,25] ya que es común que varios problemas de decisión estén bajo ambientes de incertidumbre, vaguedad e imprecisión de la información y que usualmente sean modelados con información lingüística porque es habitual este uso del lenguaje por parte de los expertos involucrados, originando una toma de decisiones lingüística, de ahí que el proceso de toma de decisiones demande procesos de CWW para dar solución a problemas GDM [24].

Otro aspecto importante a tener en cuenta es la capacitación, pues las exigencias del mundo globalizado actual, ha hecho que las personas dentro de las organizaciones deban poseer diversas habilidades, las cuales les permitan desarrollar variadas actividades y adaptarse a distintas necesidades que el mismo entorno laboral y organizacional les exija[1]. Como todo proceso, la preparación y superación de los directivos requiere ser evaluada sistemáticamente para valorar su efectividad. Dicha evaluación involucra múltiples criterios, muchos de los cuales tienen un carácter subjetivo, resultando muy difícil realizar una medición exacta de los mismos[1]. De ahí que hablar sobre el impacto de la capacitación y su estudio no sea algo novedoso. Se han presentado trabajos sobre la evaluación del impacto de la capacitación en [1] y en la misma se presenta una forma de evaluarla utilizando la lógica difusa a través del sistema de inferencia borroso Mandami [26]. El sistema presentado en el artículo dificulta de cierta manera tomar decisiones ya que se están usando grados de pertenencia asociados a conjuntos difusos y además por el hecho de que los equipos de gestión de la información no suelen ser expertos en lógica difusa, lo que entorpece de cierto modo que se haga una correcta toma de decisiones por parte de los expertos, aunque no deja de ser una excelente propuesta. De ahí que se proponga la CWW sobre la base de la lógica difusa por ser un marco conceptual para calcular y razonar con palabras en lugar de números[27] ya que tiene como objetivo primordial el de dotar de un medio adecuado a los sistemas difusos basados en lógica difusa. Zadeh en su ensayo[28], apunta a dos requisitos por los cuales se debía computar por palabras y no por números:

- Cuando la información disponible es demasiado imprecisa para justificar el uso de los números.
- Cuando hay una tolerancia a la imprecisión que puede ser explotada para conseguir robustez y dar un mayor acercamiento a la realidad.

Por lo tanto, se adaptarán los problemas GDM al problema de evaluar el impacto de la capacitación ya que el uso de

variables lingüísticas implica procesos de CWW[28]. También la propuesta presentará un caso de estudio real para ilustrar la utilidad y eficacia de que los expertos proporcionen sus opiniones en diferentes dominios, de acuerdo con la incertidumbre y la naturaleza diversa (cuantitativa y cualitativa) de sus criterios, teniendo en cuenta un marco de evaluación heterogénea [3,7] para evaluar el impacto de la capacitación de un grupo de trabajadores y así tomar decisiones lingüísticas sobre los mismos. El método que se utilizó no unifica la información heterogénea en etiquetas lingüísticas directamente, pero si en conjuntos difusos sobre los BLTS mencionados anteriormente siguiendo el esquema propuesto en [16], unificación, agregación y transformación en 2-tuplas. Para luego utilizar diferentes funciones de transformación y operadores de agregación, que nos permitirán arribar a conclusiones [29] modelando la incertidumbre de la información dada de una manera precisa y así lograr una correcta toma de decisiones más acorde a la realidad.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Computación con palabras en un marco heterogéneo

La CWW es una metodología en la que los objetos de la computación son palabras o frases definidas en un lenguaje natural en lugar de números. La metodología se basa en un procedimiento que incluye una fase de traducción y una fase re-traducción [24,25,30], emulando los procesos cognitivos humanos para mejorar la resolución de los procesos de los problemas relacionados con la incertidumbre, es decir, para hacer procesos y decisiones de razonamiento en entornos de incertidumbre y de imprecisión [31] (ver Fig.1). La misma se ha convertido recientemente en un importante tema de investigación en el que se han propuesto diferentes metodologías y varios enfoques [15,24].

Un enfoque común para modelar la información lingüística es el enfoque lingüístico difuso [32] que utiliza la teoría de conjuntos difusos [33] para gestionar la incertidumbre y el modelo de información, con el uso de variables lingüísticas [32]. Con el fin de hacer frente a estas variables lingüísticas se hace necesario escoger los descriptores lingüísticos apropiados para el conjunto de términos y su semántica, en [32,34] se muestran diferentes maneras para llevar a cabo estas selecciones.

La CWW se ha utilizado en disímiles áreas según señala [24]. En la evaluación y selección de proveedores, administración de recursos humanos, gestión del conocimiento, selección y evaluación de proyectos, entre otras. Lo que demuestra la estrecha relación que tiene con los problemas cargados de imprecisión e incertidumbre y a áreas del saber donde se necesitan procesos de evaluación. De ahí que la propuesta de evaluación del impacto de la capacitación, implemente procesos de CWW [24,35] usando multi-etapas en los procesos de agregación de la información y que considere además un marco heterogéneo ya que la valoración de la información proveniente de las personas responsables de adoptar las decisiones puede ser no solo *crisp*, vaga o con incertidumbre, también se pueden ver de varias formas, incluyendo etiquetas lingüísticas multi-granulares, números difusos, intervalos numéricos y números reales [2,3].

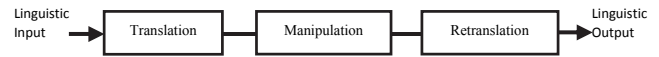


Figura 1. Esquema de CWW.  
Fuente: Tomado de [13].

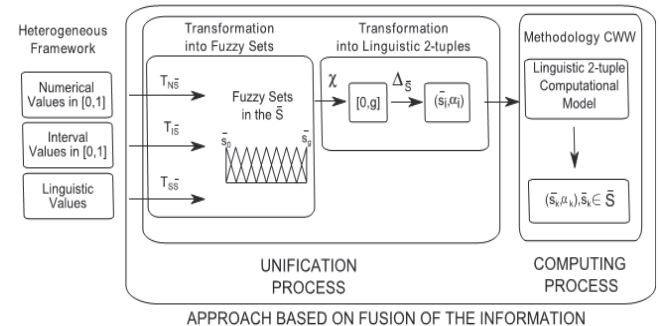


Figura 2. Enfoque basado en la fusión de la información en valores lingüísticos.  
Fuente: Tomado de [2,12].

### 2.2. Problemas de toma de decisiones grupales (GDM)

Los problemas GDM, de manera general consisten en situaciones de decisión en el que dos o más expertos expresan sus valoraciones sobre un conjunto de alternativas para obtener una solución (sobre una alternativa o un conjunto de alternativas), para ello se supone que hay un conjunto finito de alternativas:

$$X = \{x_1, \dots, x_n\}, n \geq 2$$

Así como un conjunto finito de expertos:

$$E = \{e_1, \dots, e_m\}, m \geq 2$$

Dependiendo ya sea de la naturaleza de las alternativas o sobre el conocimiento que tengan los expertos acerca de las mismas[7]. De manera general la solución a los problemas GDM está dada por una fase de agregación y explotación [24, 36], fases que serán enriquecidas con la teoría de la CWW y el modelo lingüístico 2-tuplas, para generar resultados lingüísticos (ver Fig.2).

El modelo de representación lingüística 2-tuplas ha sido presentado en [15]. El cual se muestra como el más adecuado para resolver problemas GDM [13], ya que ha sido utilizado como base para diferentes modelos de problemas basados en análisis de decisiones y toma de decisiones. En trabajos sobre evaluación de riesgos, en modelos de evaluación, toma de decisiones grupales y multi-criterio, evaluación sensorial, recursos humanos, por solo mencionar unos pocos ejemplos. Lo que demuestra la amplia aplicabilidad de este modelo lingüístico a problemas de evaluación de manera general y a situaciones donde está presente la vaguedad e incertidumbre de la información, de ahí su amplia aplicabilidad en la actualidad [13]. A través de [13] se ha demostrado que este modelo lingüístico es una buena opción para modelar y gestionar este tipo de información, sino que también implica

la realización de procesos de CWW ya que es una herramienta que ha mejorado significativamente los procesos de resolución de problemas con base en la CWW, con respecto a la exactitud y la comprensión de los resultados de tales procesos. También porque es un enfoque para tratar y dar solución a problemas con la información heterogénea presentada en [7]. Sin embargo, esto no significa que cada problema se pueda modelar y sea resuelto con éxito por este modelo, por el contrario, aún existen diferentes retos que el modelo de representación lingüística 2-tupla deba enfrentar para satisfacer las necesidades más importantes que se requieran en problemas relacionados con la información lingüística [13].

Diferentes ventajas de esta representación para gestionar la información lingüística sobre los modelos semánticos y simbólicos se muestran en [37], ya que de forma general el dominio lingüístico puede ser tratado como continuo y en el modelo simbólico se tratan los valores como discretos mientras que el modelo computacional lingüístico basado en 2-tuplas y sus diferentes extensiones permiten llevar a cabo los procesos de CWW fácilmente y sin pérdida de información. Los diferentes puntos de vista que existen sobre la CWW [25,38] abren muchas puertas a problemas que pueden ser modelados y resueltos mediante este modelado lingüístico y procesos CWW. Debido a estas ventajas, vamos a utilizar este modelo de representación lingüística para construir el proceso de agregación de la información heterogénea.

Este modelo lingüístico toma como base el modelo de agregación simbólica[39] y además define el concepto de traslación simbólica. La cual es utilizada para representar la información lingüística por medio de un par de valores denominados lingüística de 2-tuplas,  $(s, \alpha)$ , donde  $s$  es un término lingüístico y  $\alpha$  es un valor numérico que representa la traslación simbólica, donde  $\alpha$  pertenece a  $[-.5, .5]$ , es decir, la traslación simbólica tiene que estar establecida en ese rango. Gráficamente, se puede ver como más detalle como muestra la Fig.3 y 4



Figura 3. Ejemplo de una traslación simbólica.  
Fuente Tomado de [7].

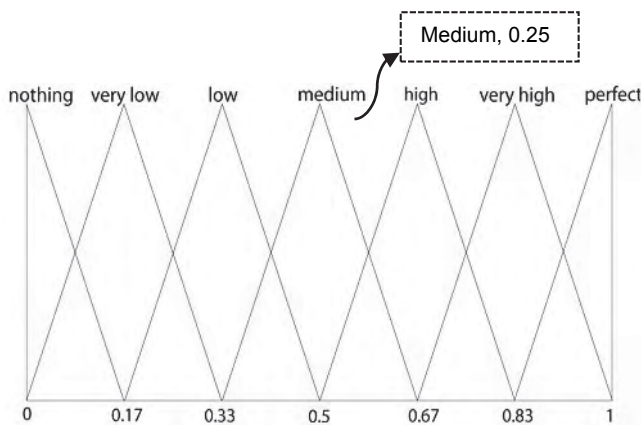


Figura 4. Representación lingüística 2-tuplas.  
Fuente: Tomado de [13,24].

En la mayoría de las ocasiones, los problemas GDM se encuentran definidos en marcos complejos. Por lo que es importante dejar de manifiesto que en estos problemas que están bajo incertidumbre es común que la información se presente de las siguientes maneras[13]:

-*Información lingüística multi-granular*: En problemas con múltiples expertos o varios criterios en la que aparece la información lingüística evaluada en varios conjuntos de términos lingüísticos con diferente granularidad [17,40,41].

-*Información no homogénea o heterogénea*: Problemas cuya información pueden ser de distinta naturaleza (lingüística, numérica, con intervalos de valores)[7].

-*Información lingüística no uniformemente distribuida*: Problemas cuya información lingüística están representadas en una escala lingüística no uniforme ni simétricamente distribuida[42].

Esto no son más que los marcos complejos que pueden ser abordados empleando las extensiones del modelo lingüístico 2-tuplas [29].

### 2.3. Análisis de decisión para un proceso evaluación

El análisis de decisiones [43] es una disciplina que pertenece a la teoría de decisión, que se ha aplicado con éxito para resolver problemas de evaluación en el campo de la energía sostenible y otras áreas, tales como la evaluación sensorial, calidad de servicio, la evaluación del desempeño, inteligencia de negocios, evaluación de sistemas, herramientas de promoción, selección de proveedores, bibliotecas digitales y desarrollo de nuevos productos [2,12].

Los objetivos de un proceso de evaluación consisten en calcular un conjunto de evaluaciones generales que resuma la información recogida y proporcione información útil sobre el conjunto de los elementos evaluados. Para ello, es necesario establecer un marco de evaluación para evaluar tales elementos, recopilar la información y finalmente calcular una evaluación final para cada elemento[2]. Por lo tanto, es evidente que el análisis de decisión es una excelente herramienta para la evaluación [12], ya que incluye una amplia variedad de métodos para la evaluación de un conjunto de alternativas, teniendo en cuenta todos los criterios pertinentes en un problema de decisión y la participación de expertos [44]. Los métodos de análisis de decisión proporcionan un criterio racional de una manera sencilla y rápida, ya que la evaluación final más alta hace corresponder normalmente al mejor elemento evaluado [45], de aquí que un proceso de evaluación se pueda modelar como un problema de análisis de decisión [12]. Un esquema clásico de análisis de decisión se resume como indica la Fig.5.

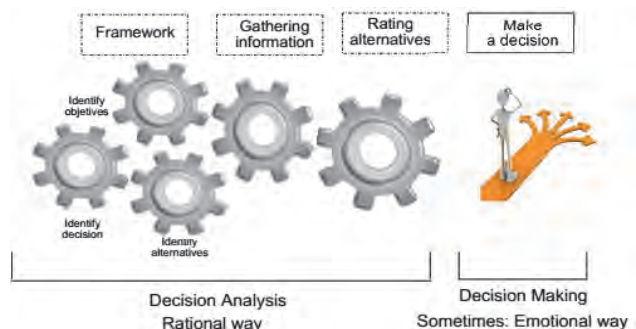


Figura 5. Esquema de toma de decisiones.  
Fuente: Tomado de [2,12].

-*Marco*: define la estructura del problema y de los dominios de expresión en el que las preferencias pueden ser evaluadas.

-*Recopilación de información*: los tomadores de decisiones proporcionan su información. Se almacena el conocimiento.

-*Alternativas*: se obtiene una apreciación colectiva de cada alternativa.

Es de destacar que un proceso de evaluación no implica necesariamente la última fase.

#### 2.4. Proceso para evaluar el impacto de la capacitación

Este proceso no es más que un marco de evaluación heterogéneo en el que cada colectivo de expertos pueda utilizar distintos dominios, según sea la naturaleza de los criterios, el grado de conocimiento, percepciones y sentimientos acerca de la problemática en cuestión para evaluar un conjunto de alternativas [2,29]. Tal tipo de problema, con varios formatos de información es muy complejo e interesante en aplicaciones prácticas en la teoría de toma de decisiones [3]. Especialmente, en situaciones donde modelos matemáticos precisos no están disponibles y la participación humana es necesaria.

Primero que todo se establece el marco de evaluación del problema. Es donde se definen las principales características y la terminología del proceso, se definen las alternativas, los atributos que caracterizan a las alternativas y los criterios a utilizar, es decir, las dimensiones en el que los expertos evalúan sus diferentes puntos de vista, mediante el uso de múltiples dominios de expresión. Por ejemplo: Un conjunto de trabajadores  $X = \{X_1, \dots, X_n\}$  para ser evaluado por tres colectivos: un conjunto de supervisores  $A = \{a_1, \dots, a_r\}$ , un conjunto de colaboradores  $B = \{b_1, \dots, b_s\}$  y un conjunto de clientes  $C = \{c_1, \dots, c_t\}$  mediante un conjunto de criterios  $Y = \{Y_1, \dots, Y_p\}$ . Las evaluaciones serán proporcionadas por los miembros de los colectivos  $a_i \in A$ ,  $b_i \in B$  y  $c_i \in C$ , sobre el trabajador  $X_j$  y de acuerdo con los criterios  $Y_k$ , son denotados por  $a^{ik}_j$ ,  $b^{ik}_j$  y  $C^{ik}_j$ , respectivamente.

- *Recopilación y unificación de información*. Definido este marco se pasa a la siguiente fase, la recopilación de la información, en la que cada experto proporciona sus valoraciones para cada una de las alternativas valorando para ello los diferentes atributos definidos anteriormente. Esto no es más que llenar una base de conocimiento para el problema en cuestión. Luego todas las valoraciones son unificadas en un mismo dominio lingüístico como valoraciones lingüísticas 2-tupla de modo que posteriormente pueda ser llevado a cabo el proceso de agregación multi-etapa:

1-Transformación de la información en conjuntos borrosos en  $\underline{S}$ , donde la información heterogénea va a ser unificada en un único dominio lingüístico específico llamado BLTS [7], que se selecciona con el objetivo de mantener el mayor conocimiento posible. Cada número real, valor de intervalo y valor lingüístico se transforma entonces en un conjunto difuso sobre  $\underline{S} = \{S_1, S_2, S_3, \dots, S_n\}$ ,  $F(\underline{S})$  utilizando la función de transformación correspondiente (ver Fig.6).

2-Transformación de los conjuntos borrosos,  $F(\underline{S})$ , en 2-tuplas lingüísticas en  $\underline{S}$ . Los conjuntos difusos anteriores se llevan a cabo en 2-tuplas lingüísticas que facilitan los

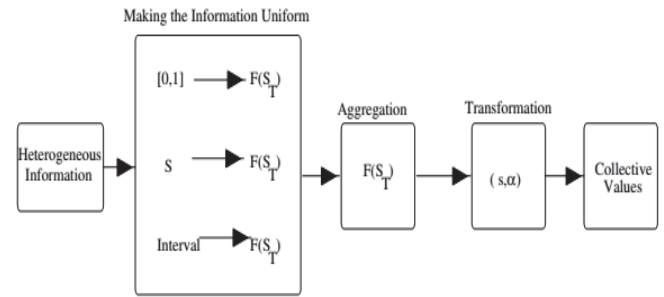


Figura 6. Proceso de agregación de información heterogénea en BLTS. Fuente: Tomado de [7, 13].

procesos de CWW y producen resultados interpretables. De ese modo, siendo  $\beta \in [0, g]$ , el valor generado por una operación de agregación simbólica, que puede asignar una 2-tupla  $(s, \alpha)$  que expresa la información equivalente a la dada por  $\beta$ . Esto facilita un proceso de ranking en la fase de explotación para la toma de decisiones.

- *Cálculo y evaluación del proceso*. El modelo de representación lingüística 2-tuplas tiene un modelo de evaluación lingüística asociado que lleva a cabo los procesos de CWW de una manera precisa y para ello se han propuesto diferentes operadores de agregación para el mismo [15,46,47], los cuales cubren las necesidades más frecuentes de los diferentes problemas que se pueden presentar. La elección del operador de agregación apropiado depende en cada problema de la decisión individual. Seleccionados los operadores de agregación a emplear, son calculadas de forma automatizada las valoraciones colectivas de cada alternativa a partir de las valoraciones unificadas obtenidas en el proceso de unificación para luego obtener una evaluación global lingüística ordenada, fácil de entender y de interpretar. Las valoraciones globales son expresadas de tal forma que puedan ser fácilmente interpretadas después del proceso de agregación y así tomar las decisiones.

#### 2.5. Modelación del problema

Para llevar a cabo un proceso de evaluación del impacto de la capacitación con éxito es utilizado el esquema de análisis de decisión y funcionamiento que se muestra en la Fig.5, cubriendo lo esencial de las fases de análisis de decisión [43]. Siguiendo la metodología que se observa en la Fig.7 y el enfoque de la Fig.2, las cuales se explican en [2] con más detalle, para manejar información heterogénea [7].

En la sección, se muestra un caso de estudio real que visualiza la ventaja y validez del modelo integrado propuesto, el cual permite gestionar los datos en un marco de evaluación heterogéneo y que proporciona evaluaciones lingüísticas en cada etapa del proceso con el fin de estar cerca del modelo cognitivo humano, teniendo en cuenta la interacción entre los criterios y las alternativas. Para ello, es utilizado el software FLINTSTONES, que no es más que una novedosa suite para resolver problemas de toma de decisiones lingüísticas basadas en el modelo lingüístico 2-tupla y sus extensiones, con el fin de hacer frente a marcos lingüísticos y complejos [29].

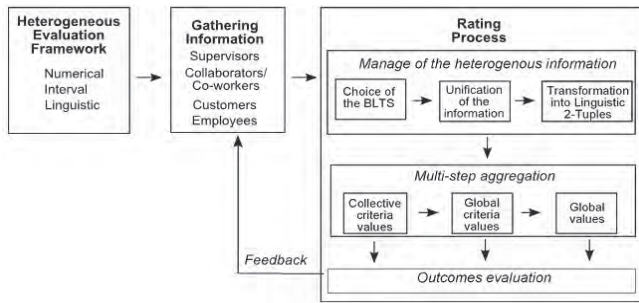


Figura 7. Modelo de evaluación.  
Fuente: Tomado de [2,48].

Dado un grupo de trabajadores, los cuales se capacitan para elevar sus competencias en la dirección de sus empresas se necesita de forma general conocer cuáles son los que han tenido un alto, medio y bajo impacto con la capacitación recibida, teniendo en cuenta que repercusiones ha tenido dicha capacitación en sus respectivas organizaciones. Esta evaluación se realiza después de haber concluido el curso de dirección y que haya transcurrido el tiempo suficiente como para que su efecto se pueda manifestar en la gestión empresarial. Ver con ello, el nivel de preparación frente a sus organizaciones. El problema en cuestión es presentado en [1] así como las variables o indicadores que se utilizarán para valorar a los mismos:

-Y<sub>1</sub>: Satisfacción del personal: expresa el grado de concordancia entre las expectativas que cada persona genera y las compensaciones que el curso le provee.

-Y<sub>2</sub>: Aprendizaje: es el proceso por el que las personas adquieren conocimientos, técnicas y actitudes a través de la experiencia, la reflexión, el estudio o la instrucción, así como el resultado deseado tras la realización de un programa formativo.

-Y<sub>3</sub>: Desempeño en el puesto: son las actividades que realiza el dirigente para cumplir con los objetivos establecidos. Cada empresa define los indicadores que considere para evaluar a sus dirigentes, los cuales pueden ser: cumplimiento de los objetivos de trabajo, responsabilidad, preocupación por sus subordinados, superación, intercambio con todos los trabajadores de la empresa, entre otros.

-Y<sub>4</sub>: Clima organizacional: es la forma en que el dirigente percibe su trabajo, su rendimiento, su productividad y satisfacción en la labor que desempeña. Se evalúa de acuerdo al liderazgo, comunicación, trabajo en equipo, condiciones de trabajo, estimulación, motivación y nivel de capacitación.

-Y<sub>5</sub>: Disciplina laboral: cumplimiento de los objetivos del puesto de trabajo en correspondencia con los objetivos de la empresa, lo cual exige tiempo de trabajo dedicado a los mismos.

-Y<sub>6</sub>: Resultados económicos: es el cumplimiento de los objetivos de la empresa en términos económicos, reflejando los beneficios y pérdidas de la misma. Es el aporte social de la institución.

En [1] fueron tratados todos los indicadores como variables lingüísticas, pero en este trabajo por la propia naturaleza de algunas de ellas y la concepción que tienen algunos expertos sobre las mismas, se tratarán varias de ellas numéricamente. Como se describió anteriormente en

secciones anteriores, la información heterogénea puede conducir a dominios lingüísticos y numéricos de acuerdo con la incertidumbre y la naturaleza de los criterios, por lo que cada experto expresará su opinión mediante varios dominios de expresión, los cuales pueden ser numérico, intervalo o lingüístico. En el problema, los expertos expresan sus valoraciones en dominios lingüísticos y numéricos, denotados por  $S_1$  y  $S_2$ , para los lingüísticos y  $S_3$  y  $S_4$  para los numéricos.

Los expertos utilizarán:

1. El dominio lingüístico  $S_1$  para evaluar el criterio satisfacción del personal.
2. De ellos 4, hacen uso del dominio lingüístico  $S_2$  y 3 del dominio numérico  $S_3$  para evaluar el aprendizaje.
3. El dominio lingüístico  $S_2$  para evaluar el desempeño en el puesto de trabajo.
4. El dominio lingüístico  $S_1$  para evaluar el clima organizacional.
5. De ellos 6, hacen uso del dominio numérico  $S_4$  y 1 del dominio lingüístico  $S_1$  para evaluar la disciplina laboral.
6. De ellos 5 de los 7 expertos, del dominio lingüístico  $S_2$ , para evaluar los resultados económicos ya que son los únicos con la experiencia necesaria y el conocimiento suficiente para dar una valoración precisa acerca de la misma.

Los dominios para representar el conocimiento experto van a estar conformados de la siguiente manera:

$S_1 = \{\text{Null (N), Low (L), Medium (M), High (H), Excellent (E)}\}$  y  $S_2 = \{\text{Low (L), Medium (M), High (H)}\}$ .

$S_3 = [2, 5]$  y  $S_4 = [1, 4]$ . Estos últimos pueden darse como un único número real o un rango de valores definidos en sus respectivos intervalos.

-*Base de evaluación heterogénea*. La base de evaluación heterogénea va a estar conformada por un grupo de variables o criterios con los cuales se va a evaluar el impacto de la capacitación recibida por los directivos, llamados trabajadores; a partir de la opinión de un conjunto de evaluadores

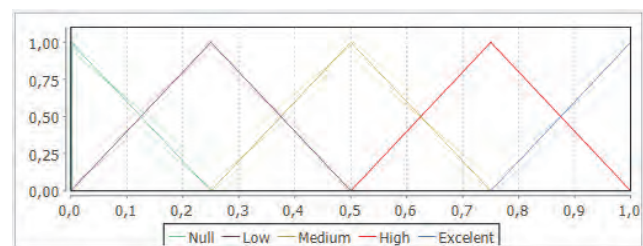


Figura 7. Dominio lingüístico  $S_1$ .

Fuente: Elaboración propia.

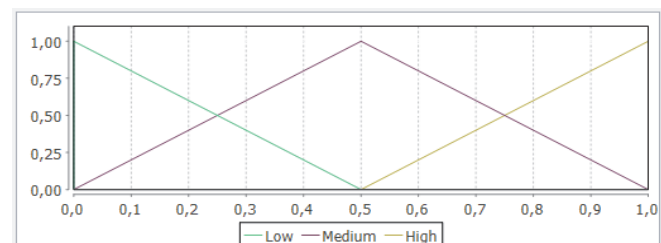


Figura 8. Dominio lingüístico  $S_2$ .

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1.  
Base de conocimiento del sistema.

| # | Alternativa   | Criterio           | Dominio | Evaluación |
|---|---------------|--------------------|---------|------------|
| 1 | Trabajador-01 | Aprendizaje        | $S_3$   | 3          |
| 2 | Trabajador-02 | Aprendizaje        | $S_2$   | Medium     |
| 3 | Trabajador-03 | Satisfacción       | $S_1$   | High       |
| 4 | Trabajador-04 | Disciplina laboral | $S_4$   | [3,4]      |
| 5 | Trabajador-05 | Clima organizac.   | $S_1$   | Medium     |

Fuente: Elaboración propia.

o expertos y los dominios antes mencionados. Los expertos no son más que un conjunto de especialistas, en su mayoría académicos conocedores de las políticas generales de la organización con alta experiencia laboral o simplemente trabajadores con una vasta experiencia. Para ello, se trabajó con un grupo de 15 trabajadores,  $X = \{X_1, \dots, X_{15}\}$ , de los cuales se necesita saber cuál de ellos alcanza los mejores resultados después de la capacitación reciba y así sucesivamente. Los mismos no son más que las alternativas del problema, de acuerdo a los 6 criterios antes mencionados,  $Y = \{Y_1, \dots, Y_6\}$ , para ser evaluados por 7 expertos. Destacar que no necesariamente los expertos tengan que evaluar todas las alternativas debido a que no cuentan con la suficiente información para dar una valoración precisa o puedan tener alguna relación de favoritismo con algún trabajador, lo que demeritaría la veracidad de la evaluación.

### 2.5.1. Recopilación de la información

Una vez que el marco de evaluación haya sido fijado y que todos los datos hayan sido puestos en esta etapa (Base), que no es más que definir la fase inicial del proceso donde se especifican todos los dominios lingüísticos así como los criterios y alternativas del caso de estudio, es decir, donde se definirán todos los valores del problema, se procederá a la evaluación que darán los expertos sobre los trabajadores que pasaron el curso. En la Tabla 1 se muestra a modo de ejemplo una parte de la base de conocimiento por la que está conformado el sistema.

En la Tabla 1, se muestra que el experto 1 evalúa al trabajador 1 utilizando el criterio aprendizaje y el dominio numérico  $S_3$  y le da una evaluación de 3, la cual es un valor definido dentro de ese dominio numérico. Lo mismo ocurre para los demás casos que se muestran, por lo que de esa manera sucesivamente se definirán las opiniones de los expertos sobre todos los demás casos del sistema, que no son más que los trabajadores y criterios.

### 2.5.2. Proceso de evaluación

De acuerdo con el modelo propuesto integrado en la Sección 2, se llevan a cabo las tres etapas del proceso de evaluación.

-*Unificación de la información heterogénea.* La información lingüística y numérica será agregada en múltiples etapas, obteniendo las valoraciones intermedias y globales del rendimiento de cada trabajador. La información

heterogénea va a ser unificada por un único dominio lingüístico llamado BLTS, llamado  $S_1$  y así llevar a cabo el proceso de CWW para proveer los resultados lingüísticos.  $S_1$  está compuesto por 5 términos lingüísticos, con el objetivo de guardar la mayor cantidad de conocimiento posible. Este dominio es clave porque las evaluaciones globales se expresarán a partir de ellas con el fin de ofrecer resultados fáciles de interpretar a raíz de la metodología de CWW. Su sintaxis es la siguiente:

$$S_1 = \{\text{Null (N), Low (L), Medium (M), High (H), Excellent (E)}\}.$$

De manera general el proceso primeramente transforma los valores numéricos en el intervalo  $[0, 1]$ , luego los términos lingüísticos en  $S_1$  y el valor de los intervalos en  $S_1$ . Después de obtener un conjunto difuso en el dominio BLTS agregando los valores de preferencia individuales se transforma la información lingüística en 2-tuplas, por lo que calcular el BLTS, no es más que calcular los puntos de cruce de las etiquetas lingüísticas  $S_1$  y  $S_2$  así como los dominios  $S_3$  y  $S_4$  con los del dominio BLTS [7], como se ha mencionado anteriormente.

- *Proceso de agregación multi-etapa.* Después que se pasa de la valoración en el dominio original a una valoración en el dominio BLTS, es decir, de una valoración lingüística a una valoración unificada, pasamos al proceso de agregación. En la etapa, se calculan las evaluaciones globales e intermedias para cada trabajador a través de un proceso de agregación de varios pasos, considerando un conjunto adecuado de operadores, con el fin de satisfacer las necesidades de evaluación de los resultados de acuerdo con la interacción entre los criterios y peso de los expertos. En la primera etapa del proceso, es aplicado el operador media aritmética 2-tuplas lingüística atendiendo al colectivo de expertos, por su sencillez y fácil aplicabilidad. En la segunda etapa del proceso son agregados los criterios, aplicando el operador OWA 2-tuplas lingüística porque es anónimo y no distingue el origen de las evaluaciones. El peso no está asociado a un usuario concreto, sino a la magnitud de la evaluación [2].

Yager [49], propone el uso de los cuantificadores que facilitan expresar el concepto de mayoría difusa, los cuantificadores lingüísticos no decrecientes [50], en concreto, el cuantificador lingüístico "Most". Concluido esto, se han obtenido los resultados lingüísticos para cada trabajador en cada etapa del proceso de agregación multi-etapa, siguiendo la metodología de CWW, logrando resultados que están cerca del modelo cognitivo humano ya que proporcionan una buena interpretabilidad y comprensibilidad en lenguaje natural.

## 3. Fase de Evaluación: evaluación de los resultados

Finalmente, se ponen en orden todos los valores calculados en el proceso con el propósito de identificar el trabajador de mayor impacto en su capacitación entre todos los trabajadores, usando las evaluaciones finales apoyadas en el proceso de CWW y su extensión 2-tuplas, lo cual es fundamental a la hora de hacer un ranking ordenado de las evaluaciones (ver Tabla 2). La traslación simbólica permitirá

Tabla 2.

Resumen de los resultados al evaluar el impacto de la capacitación.

| RESULTADOS GENERALES |                         | RESULTADOS DISCRIMINANDO LAS VARIABLES SIGUIENTES: |                        |                 |                      |                    |                       |
|----------------------|-------------------------|----------------------------------------------------|------------------------|-----------------|----------------------|--------------------|-----------------------|
| No.                  | RANKING                 | Satisfacción del personal                          | Desempeño en el puesto | Aprendizaje     | Clima organizacional | Disciplina laboral | Resultados económicos |
| 1                    | X <sub>1</sub> -High    | X <sub>1</sub>                                     | X <sub>2</sub>         | X <sub>1</sub>  | X <sub>4</sub>       | X <sub>1</sub>     | X <sub>1</sub>        |
| 2                    | X <sub>4</sub> -High    | X <sub>10</sub>                                    | X <sub>4</sub>         | X <sub>4</sub>  | X <sub>1</sub>       | X <sub>2</sub>     | X <sub>12</sub>       |
| 3                    | X <sub>2</sub> -High    | X <sub>4</sub>                                     | X <sub>12</sub>        | X <sub>1</sub>  | X <sub>12</sub>      | X <sub>4</sub>     | X <sub>2</sub>        |
| 4                    | X <sub>3</sub> -High    | X <sub>12</sub>                                    | X <sub>10</sub>        | X <sub>10</sub> | X <sub>3</sub>       | X <sub>10</sub>    | X <sub>4</sub>        |
| 5                    | X <sub>12</sub> -Medium | X <sub>6</sub>                                     | X <sub>1</sub>         | X <sub>12</sub> | X <sub>11</sub>      | X <sub>3</sub>     | X <sub>10</sub>       |
| 6                    | X <sub>11</sub> -Medium | X <sub>11</sub>                                    | X <sub>3</sub>         | X <sub>3</sub>  | X <sub>10</sub>      | X <sub>12</sub>    | X <sub>11</sub>       |
| 7                    | X <sub>10</sub> -Medium | X <sub>2</sub>                                     | X <sub>11</sub>        | X <sub>4</sub>  | X <sub>8</sub>       | X <sub>11</sub>    | X <sub>3</sub>        |
| 8                    | X <sub>8</sub> -Medium  | X <sub>3</sub>                                     | X <sub>8</sub>         | X <sub>9</sub>  | X <sub>2</sub>       | X <sub>6</sub>     | X <sub>14</sub>       |
| 9                    | X <sub>6</sub> -Medium  | X <sub>14</sub>                                    | X <sub>13</sub>        | X <sub>2</sub>  | X <sub>15</sub>      | X <sub>8</sub>     | X <sub>9</sub>        |
| 10                   | X <sub>9</sub> -Medium  | X <sub>5</sub>                                     | X <sub>9</sub>         | X <sub>8</sub>  | X <sub>6</sub>       | X <sub>9</sub>     | X <sub>8</sub>        |
| 11                   | X <sub>14</sub> -Medium | X <sub>15</sub>                                    | X <sub>6</sub>         | X <sub>13</sub> | X <sub>9</sub>       | X <sub>14</sub>    | X <sub>6</sub>        |
| 12                   | X <sub>15</sub> -Medium | X <sub>8</sub>                                     | X <sub>5</sub>         | X <sub>14</sub> | X <sub>13</sub>      | X <sub>5</sub>     | X <sub>15</sub>       |
| 13                   | X <sub>5</sub> -Medium  | X <sub>9</sub>                                     | X <sub>7</sub>         | X <sub>11</sub> | X <sub>14</sub>      | X <sub>15</sub>    | X <sub>5</sub>        |
| 14                   | X <sub>13</sub> -Medium | X <sub>13</sub>                                    | X <sub>14</sub>        | X <sub>5</sub>  | X <sub>5</sub>       | X <sub>7</sub>     | X <sub>13</sub>       |
| 15                   | X <sub>7</sub> -Medium  | X <sub>7</sub>                                     | X <sub>15</sub>        | X <sub>7</sub>  | X <sub>7</sub>       | X <sub>13</sub>    | X <sub>7</sub>        |

Fuente: Elaboración propia.

conocer cuan cerca está del valor real que representa, recordar figuras 3 y 4, es el X<sub>1</sub>. Por ejemplo, en el caso de estudio el valor global más alto alcanzado entre todos los trabajadores se corresponde con (High,-0.30) y pertenece al trabajador X<sub>1</sub>. Por lo tanto X<sub>1</sub> es dentro del grupo de 15 el que alcanza mejores resultados. Pero existe otro trabajador, por ejemplo X<sub>4</sub> con evaluación (High, 0.38) y a pesar de que los dos tienen un alto impacto de la capacitación “High”, el mejor sería X<sub>1</sub> ya que está más cerca de (High, 0.0), es decir, cuando más cerca este de 0, más “High” será. Se puede decir entonces que el trabajador X<sub>4</sub> es menos “High” que X<sub>1</sub>, y así sucesivamente hasta tener todas las evaluaciones para los demás trabajadores.

Además, si se requiere de una evaluación global de los trabajadores discriminando uno o más criterios (ver Tabla 2), se puede observar que cambia el orden de las evaluaciones, lo que es bueno si se desea realizar un análisis más minucioso por parte del panel de expertos, así como si se requiere desechar la opinión de 1 o varios expertos. Esto demostraría que indicador o que experto tiene más peso en las evaluaciones finales y cual no, lo que sería de vital importancia a la hora de hacer un correcto análisis de los resultados y a la hora de determinar qué factores se deben mejorar con un nuevo curso de capacitación, entre otras cosas.

#### 4. Discusión

Dando cumplimiento a los objetivos perseguidos en este trabajo, para el procesamiento de los datos y validar la robustez con que el sistema responde a las distintas interrogantes a partir de los datos de entrada se utilizó el paquete estadístico Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) el cual es muy usado en las ciencias sociales. Para ello se emplearon varias pruebas estadísticas para ver el nivel de concordancia y la certeza de los datos que resultan de evaluar con el software FLINTSTONES con las dadas por un panel de expertos. Comparando los datos analizados se observa que el experimento arrojó una alta coincidencia de los valores de salida con los criterios generados por los especialistas. Al aplicarse las tablas de contingencia el experimento alcanzó un 80% de concordancia entre los expertos

y el sistema, ya que la concordancia exacta entre los mismos se logra en 12 de 15 casos (ver Tabla 3 y 4). Luego se aplicó la prueba Wilcoxon para comparar grupos y ver si las dos muestras están relacionadas, lo cual dio una significación de 0.564 por lo que no existen diferencias significativas entre los datos resultantes, lo que da una medida de fiabilidad de los resultados dados por el software.

Tabla 3.

Datos dados por el software y el panel de expertos.

| RANKING | SOFTWARE                | SISTEMA EXPERTO         |
|---------|-------------------------|-------------------------|
| 1       | X <sub>1</sub> -High    | X <sub>1</sub> -High    |
| 2       | X <sub>4</sub> -High    | X <sub>2</sub> -High    |
| 3       | X <sub>2</sub> -High    | X <sub>4</sub> -High    |
| 4       | X <sub>3</sub> -High    | X <sub>3</sub> -High    |
| 5       | X <sub>12</sub> -Medium | X <sub>12</sub> High    |
| 6       | X <sub>11</sub> -Medium | X <sub>10</sub> High    |
| 7       | X <sub>10</sub> -Medium | X <sub>11</sub> -Medium |
| 8       | X <sub>8</sub> -Medium  | X <sub>8</sub> -Medium  |
| 9       | X <sub>6</sub> -Medium  | X <sub>6</sub> -Medium  |
| 10      | X <sub>9</sub> -Medium  | X <sub>9</sub> -Medium  |
| 11      | X <sub>14</sub> -Medium | X <sub>14</sub> -Medium |
| 12      | X <sub>15</sub> -Medium | X <sub>5</sub> -Medium  |
| 13      | X <sub>5</sub> -Medium  | X <sub>15</sub> -Medium |
| 14      | X <sub>13</sub> -Medium | X <sub>13</sub> -Medium |
| 15      | X <sub>7</sub> -Medium  | X <sub>7</sub> -Low     |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.

Indicadores de validación de las tablas de contingencia con el uso del SPSS.

|         |              |              | Software |        | Total  |
|---------|--------------|--------------|----------|--------|--------|
|         |              |              | High     | Medium | High   |
| Experto | High         | Recuento     | 4        | 2      | 6      |
|         |              | % de Experto | 66,7%    | 33,3%  | 100,0% |
|         | Medium       | Recuento     | 0        | 8      | 8      |
|         |              | % de Experto | 0%       | 100,0% | 100,0% |
|         | Low          | Recuento     | 0        | 1      | 1      |
|         |              | % de Experto | 0%       | 100,0% | 100,0% |
| Total   | Recuento     | 4            | 11       | 15     |        |
|         | % de Experto | 26.7%        | 73.3%    | 100.0% |        |

Fuente: Elaboración propia.

## 5. Conclusiones

Con el uso de la metodología de CWW se alcanza un conjunto de resultados que están más próximos al modelo cognitivo humano, lo que hace que los resultados alcanzados puedan ser entendibles e interpretables por los diferentes expertos ya que se expresan de forma lingüística. Por otra parte, el modelo que se maneja permite obtener una evaluación global del impacto de la capacitación para cada trabajador de acuerdo a las opiniones de cada grupo de expertos y los criterios dados por los mismos, demostrando la utilidad y eficacia de la metodología usada. La utilización de la *suite* FLINTSTONES en esta contribución como una herramienta basada en el modelo lingüístico 2-tupla y sus extensiones destinada a la resolución de problemas de toma de decisiones definidos en marcos lingüísticos y complejos ha logrado dar una mayor organización de trabajo y ha permitido tomar decisiones en un marco de evaluación flexible en el que los expertos pueden expresar su evaluación de acuerdo con la incertidumbre y la naturaleza heterogénea de los criterios. La evaluación del impacto de la capacitación demuestra la utilidad y eficacia del modelo manejado.

## Bibliografía

- [1] Esquivel-García, R., Felix-Benjamín G., and Bello-Pérez, R., Evaluación del impacto de la capacitación con lógica difusa. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 22 (1), pp. 41-52, 2014. DOI: 10.4067/S0718-33052014000100005
- [2] Espinilla, M. et al., A 360-degree performance appraisal model dealing with heterogeneous information and dependent criteria. *Information Sciences*, 222, pp. 459-471, 2013. DOI: 10.1016/j.ins.2012.08.015
- [3] Li, D.-F., Huang, Z.-G. and Chen, G.-H., A systematic approach to heterogeneous multiattribute group decision making. *Computers & Industrial Engineering*, 59, pp. 561-572, 2010. DOI: 10.1016/j.cie.2010.06.015
- [4] Alonso, S. et al., Individual and social strategies to deal with ignorance situations in multi-person decision making. *International Journal of Information Technology Decisions Making*, 8 (2), pp. 313-333, 2009. DOI: 10.1142/S0219622009003417
- [5] Alonso, S. et al., A web based consensus support system for group decision making problems and incomplete preferences. *Informations Science*, 180 (23), pp. 4477-4495, 2010. DOI: 10.1016/j.ins.2010.08.005
- [6] García, J.M.T. et al., A consensus model for group decision making problems with linguistic interval fuzzy preference relations. *Expert Systems with Applications*, 39, pp. 10022-10030, 2012. DOI: 10.1016/j.eswa.2012.02.008. DOI: 10.1016/j.eswa.2012.02.008
- [7] Herrera, F., Martínez, L. and Sánchez, P.J., Managing non-homogeneous information in group decision making. *European Journal of Operational Research*, 166 (1), pp. 115-132, 2005. DOI: 10.1016/j.ejor.2003.11.031
- [8] Cabrerizo, F.J. et al., A model based on fuzzy linguistic information to evaluate the quality of digital libraries. *International Journal of Information Technology and Decision Making*, 9 (3), pp. 455-472, 2010. DOI: 10.1142/S0219622010003907
- [9] Chiclana, F., Herrera, F. and Herrera-Viedma, E., Integrating three representation models in fuzzy multipurpose decision making based on fuzzy preference relations. *Fuzzy Sets and Systems*, 97, pp. 33-48, 1998. DOI: 10.1016/S0165-0114(96)00339-9
- [10] Fan, Z.-P., Ma, J. and Zhang, Q., An approach to multiple attribute decision making based on fuzzy preference information alternatives. *Fuzzy Sets and Systems*, 131 (1), pp. 101-106, 2002. DOI: 10.1016/S0165-0114(01)00258-5
- [11] Tian, Q., Ma, J. and Liu, O., A hybrid knowledge and model system for R&D project selection. *Expert systems with applications*, 23 (3), pp. 121-152, 2002. DOI: 10.1016/S0957-4174(02)00046-5
- [12] Espinilla, M., Palomares, I. and Martínez, L., A comparative study of heterogeneous decision analysis approaches applied to sustainable energy evaluation. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-based Systems*, 20 (1), pp. 159-174, 2012. DOI: 10.1142/S0218488512400120.
- [13] Martínez, L. and Herrera, F., An overview on the 2-tuple linguistic model for computing with words in decision making: Extensions, applications and challenges. *Information Science*, 207, pp. 1-18, 2012. DOI: 10.1016/j.ins.2012.04.025
- [14] Arango-Serna, M.D., Vergara-Rodríguez, C. and Gaviria-Montoya, H., Modelización difusa para la planificación agregada de la producción en ambientes de incertidumbre. *DYNA*, 77 (162), pp. 397-409, 2010.
- [15] Herrera, F. and Martínez, L., A 2-tuple fuzzy linguistic representation model for computing with words. *IEEE Transactions On Fuzzy Systems*, 8 (6), pp. 746-752, 2000. DOI: 10.1109/91.890332.
- [16] Herrera, F. and Martínez, L., An approach for combining linguistic and numerical information based on the 2-tuple fuzzy linguistic representation model in decision-making. *International Journal of Uncertainty Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 8 (5), pp. 539-562, 2000. DOI: 10.1142/S0218488500000381
- [17] Herrera, F. and Martínez, L., A model based on linguistic 2-tuple for dealing with multi-granular hierarchical linguistic contexts in multi-expert decision making. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. Part B: Cybernetics*, 31 (2), pp. 227-234, 2001. DOI: 10.1109/3477.915345
- [18] Yang, W. and Chen, Z., New aggregation operators based on the Choquet integral and 2-tuple linguistic information. *Expert Systems with Applications*, 39, pp. 2662-2668, 2012. DOI: 10.1016/j.eswa.2011.08.121
- [19] Chang, T.H. and Wang, T.C., A novel efficient approach for DFMEA combining 2-tuple and the OWA operator. *Expert Systems with Applications*, 37 (3), pp. 2362-2370, 2010. DOI: 10.1016/j.eswa.2009.07.026
- [20] Dong, Y.C., Xu, Y.F. and Yu, S., Linguistic multiperson decision making based on the use of multiple preference relations. *Fuzzy Sets and Systems*, 160, pp. 603-623, 2009. DOI: 10.1016/j.fss.2008.08.011
- [21] Dong, Y.C., Xu, Y.F. and Yu, S., Computing the numerical scale of the linguistic term set for the 2-tuple fuzzy linguistic representation model. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 17 (6), pp. 1366-1378, 2009. DOI: 10.1109/TFUZZ.2009.2032172
- [22] Dong, Y.C. et al., The OWA-based consensus operator under linguistic representation models using position indexes. *European Journal of Operational Research*, 203, pp. 455-463, 2010. DOI: 10.1016/j.ejor.2009.08.013
- [23] Dursun, M. and Karsak, E.E., A fuzzy MCDM approach for personnel selection. *Expert Systems with Applications*, 175 (1), pp. 247-286, 2010. DOI: 10.1016/j.eswa.2009.11.067
- [24] Martínez, L., Ruan, D. and Herrera, F., Computing with words in decision support systems: An overview on models and applications. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 3 (4), pp. 382-395, 2010. DOI: 10.2991/ijcis.2010.3.4.1. DOI: 10.1080/18756891.2010.9727709
- [25] Mendel, J.M. et al., What computing with words means to me: discussion forum. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 5 (1), pp. 20-26, 2010. DOI: 10.1109/MCI.2009.934561
- [26] Hurtado, S.M. y Gómez, G.P., Modelo de inferencia difuso para estudio de crédito. *DYNA*, 75 (154), pp. 215-229, 2008
- [27] Zadeh, L.A., Nacimiento y evolución de la lógica borrosa, el soft computing y la computación con palabras: un punto de vista personal. *Psicothema*, 8 (2), pp. 421-429, 1996.
- [28] Zadeh, L.A., Fuzzy logic = computing with words. *IEEE Transactions On Fuzzy Systems*, 4 (2), pp. 103-111, 1996. DOI: 10.1109/91.493904.
- [29] Estrella, F.J., Espinilla, M. and Martínez, L., FLINTSTONES: Una suite para la toma de decisiones lingüísticas basada en 2-tupla lingüísticas y extensiones. *XVII Congreso español sobre tecnologías y lógica fuzzy*, 2014.

- [30] Yager, R.R., On the retranslation process in zadeh's paradigm of computing with words. IEEE Transactions on systems, man and cybernetics, Part B: Cybernetics, 34 (2), pp. 1184-1195, 2004. DOI: 10.1109/TSMCB.2003.821866.
- [31] Zadeh, L.A., From computing with numbers to computing with words, from manipulation of measurements to manipulation of perceptions. IEEE Transactions on circuits and systems I: fundamental theory and applications, 46 (1), pp. 105-119, 1999. DOI: 10.1109/81.739259
- [32] Zadeh, L.A., The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning-Part I. Information sciences, 8 (3), pp. 199-249, 1975. DOI: 10.1016/0020-0255(75)90036-5.
- [33] Zadeh, L.A., Fuzzy sets. Information and Control, 8 (3), pp. 338-353, 1965. DOI: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
- [34] Yager, R.R., An approach to ordinal decision making. International Journal of Approximate Reasoning, 12 (3), pp. 237-261, 1995. DOI: 10.1016/0888-613X(94)00035-2
- [35] Mendel, J.M. et al., What computing with words means to me: Discussion forum. IEEE Computational Intelligence Magazine., 5 (1), pp. 20-26, 2010. DOI: 10.1109/MCI.2009.934561
- [36] Roubens, M., Fuzzy sets and decision analysis. Fuzzy Sets and Systems 90, pp. 199-206, 1997. DOI: 10.1016/S0165-0114(97)00087-0.
- [37] Herrera, F. and Martínez, L., The 2-tuple linguistic computational model. Advantages of its linguistic description, accuracy and consistency. International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems., 9, pp. 33-49, 2001. DOI: 10.1142/S0218488501000971
- [38] Mendel, J.M. and Wu, D., Perceptual computing: Aiding people in making subjective judgments. IEEE-Wiley, 2010. DOI: 10.1002/9780470599655
- [39] Delgado, M., Verdegay, J.L. and Vila, M.A., On aggregation operations of linguistic labels. International Journal of Intelligent Systems, 8, pp. 351-370, 1993. DOI: 10.1002/int.4550080303.
- [40] Espinilla, M., Liu, J. and Martínez, L., An extended hierarchical linguistic model for decision-making problems. Computational Intelligence, 27 (3), pp. 489-512, 2011. DOI: 10.1111/j.1467-8640.2011.00385.x
- [41] Herrera, F., Herrera-Viedma, E. and Martínez, L., A fusion approach for managing multi-granularity linguistic term sets in decision making. Fuzzy Sets and Systems, 114 (1), pp. 43-58, 2000. DOI: 10.1016/S0165-0114(98)00093-1
- [42] Herrera, F., Herrera-Viedma, E. and Martínez, L., A fuzzy linguistic methodology to deal with unbalanced linguistic term sets. IEEE Transactions On Fuzzy Systems, 16 (2), pp. 354-370, 2008. DOI: 10.1109/TFUZZ.2007.896353.
- [43] Clemen, R.T., Making hard decisions. An introduction to decision analysis, Duxbury Press, 1995.
- [44] Marcomini, A., Suter, G.W. and Critto, A., Decision support systems for risk based management of contaminated sites, Springer-Verlag, Editor, New York, 2009. DOI: 10.1007/978-0-387-09722-0
- [45] Keeney, R.L. and Raiffa, H., Decisions with multiple objectives: Preferences and value tradeoffs, Sons, J.W., Ed., New York, 1976.
- [46] Wei, G.W., Some harmonic aggregation operators with 2-tuple linguistic assessment information and their application to multiple attribute group decision making. International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems, 19 (6), pp. 977-998, 2011. DOI: 10.1142/S0218488511007428
- [47] Xu, Y. and Wang, H., Approaches based on 2-tuple linguistic power aggregation operators for multiple attribute group decision making under linguistic environment, Applied Soft Computing Journal, 11 (5), pp. 3988-3997, 2011. DOI: 10.1016/j.asoc.2011.02.027
- [48] Andrés, R.D., García-Lapresta, J.L. and Martínez, L., A multi-granular linguistic model for management decision-making in performance appraisal. Soft Computing, 14 (1), pp. 21-34, 2010. DOI: 10.1007/s00500-008-0387-8.
- [49] Yager, R.R., Connectives and quantifiers in fuzzy sets. IEEE Transactions on systems man and cybernetics, 40, pp. 39-76, 1991. DOI: 10.1016/0165-0114(91)90046-s
- [50] Yager, R.R., On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision making. IEEE Transactions on systems, man and cybernetics, 18, pp. 183-190, 1988. DOI: 10.1109/21.87068

**G. Felix-Benjamín**, graduado de Lic. Ciencia de la computación en 2011 en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas (UCLV), Santa Clara, Cuba. Msc. en Ciencia de la Computación en el 2014 y pertenece al Centro de Estudios Informáticos de la institución. Sus intereses investigativos son en la disciplina de inteligencia artificial particularmente softcomputing, lógica difusa, toma de decisiones, metaheurísticas y machine learning. Ha participado en diferentes eventos tanto nacionales como internacionales y ha publicado diferentes artículos, por ejemplo en Ingeniare, revista chilena de ingeniería.

ORCID: 0000-0001-5342-8674

**C. Calero-Muela**, graduada de Ing. Industrial en 2011 en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas (UCLV), Santa Clara, Cuba. Pertenece a la Empresa de Construcción y Montaje de Sancti Spiritus. Sus intereses investigativos son sobre la gestión del capital humanos y sus procesos. Actualmente se encuentra cursando la Maestría en Ingeniería Industrial.

ORCID: 0000-0002-4574-9889

**R. Esquivel-García**, graduado de Ing. Industrial en el 2004 en la UCLV, Santa Clara, Cuba. Director de capital humano de la Universidad de Sancti Spiritus "José Martí Pérez". MSc. en Dirección y graduado de Dr. en Ciencias Técnicas en el 2014. Consultor del Centro Internacional de La Habana (CIH SA). Auditor interno de calidad para la Educación Superior.

ORCID: 0000-0002-6170-9625

**R. Bello-Pérez**, recibió su título de Licenciado en Cibernética y Matemáticas en la UCLV, Santa Clara, Cuba, en 1982, y Dr. en 1987, su interés científico radica en la disciplina de Inteligencia artificial, particularmente en metaheurísticas, softcomputing, machine learning y toma de decisiones. Ha publicado alrededor de 200 trabajos científicos. Es miembro de la Academia de Ciencias de Cuba y es el Director del Centro de Estudios en Informática de la UCLV.

ORCID: 0000-0001-5567-2638



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN

FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería  
de Sistemas e Informática

Oferta de Posgrados

Especialización en Sistemas  
Especialización en Mercados de Energía  
Maestría en Ingeniería - Ingeniería de Sistemas  
Doctorado en Ingeniería- Sistema e Informática

Mayor información:

E-mail: acsei\_med@unal.edu.co

Teléfono: (57-4) 425 5365

# Wave energy resource assessment at southern coast of the Gulf of Mexico

Alejandro González-Carrillo <sup>a</sup>, Raziel Ruiz-Cabrera <sup>a</sup>, Quetzalcoatl Hernández-Escobedo <sup>a</sup>,  
Aránzazu Fernández-García <sup>b</sup> & Francisco Manzano-Agugliaro <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Facultad de Ingeniería Universidad Veracruzana Campus Coatzacoalcas, Minatitlán, México, [alexcarrillo.gc@gmail.com](mailto:alexcarrillo.gc@gmail.com),  
[razielruizc@gmail.com](mailto:razielruizc@gmail.com), [qhernandez@uv.mx](mailto:qhernandez@uv.mx)

<sup>b</sup> CIEMAT- Plataforma Solar de Almería, Almería, Spain. [arantxa.fernandez@gmail.com](mailto:arantxa.fernandez@gmail.com)

<sup>c</sup> University of Almería, Department of Engineering, Almería, Spain. [fmanzano@ual.es](mailto:fmanzano@ual.es)

Received: September 18th, de 2014. Received in revised form: November 27<sup>th</sup>, 2014. Accepted: December 16<sup>th</sup>, 2014

## Abstract

Find alternative energy sources is one of the challenges that came with XXI century and this paper makes an analysis about wave energy, which presents several advantages over fossil based energy and even other renewable energy sources. Among them are its low environmental impact and its high energy density. Wave energy is beginning to be considered as an important and promising renewable resource in many countries. The objective of this paper is to evaluate the wave energy potential at the southern coast of the Gulf of Mexico; the sea states were observed and was obtained that the available mean wave power is 55.91 W/m. In addition, this paper shows that, in the study site, the most energetic season is fall and the less energetic season is spring. This differs from the global trend, where the most energetic season is winter, and the less energetic season is spring.

**Keywords:** renewable energy, wave energy, Gulf of Mexico

# Evaluación del potencial energético del oleaje en la costa sur del Golfo de México

## Resumen

Hallar nuevas fuentes de energía es uno de los retos que trajo consigo el siglo XXI. En este trabajo se hace un análisis sobre la energía de las olas, la cual presenta varias ventajas significativas con respecto a otras fuentes de energías basadas en combustibles fósiles e, inclusive, otras fuentes renovables de energía. De entre estas ventajas destacan el bajo impacto ambiental y su alta densidad energética, respectivamente. La energía de las olas del mar se considera cada vez en más países como un recurso renovable importante y sobre todo prometedor. El objetivo de este trabajo es la evaluación del potencial energético de las olas en la costa sur del Golfo de México; en él se observó el comportamiento del oleaje y se obtuvo que la potencia media anual disponible es de 55.91 W/m. Adicionalmente, se destaca el comportamiento estacional de las olas en la región; pues, en este punto, la estación más energética es otoño y la menos energética es primavera, lo cual difiere de la tendencia mundial, en la que invierno y verano son la más y la menos energética, respectivamente.

**Palabras clave:** Energía renovable, energía de las olas, Golfo de México.

## 1. Introducción

La creciente demanda energética global, que actualmente se estima en aproximadamente 2 TW [1], y los métodos tradicionales de generación de energía eléctrica han ocasionado problemas ambientales serios. Las fuentes de energía renovable juegan un papel muy importante en la búsqueda de alternativas para la

producción de electricidad, con el fin de disminuir el impacto negativo que produce el uso de combustibles fósiles [2,3].

Actualmente en México la mayor parte de la energía es generada a través del carbón, petróleo y gas [4], no obstante en el año 2008 se promulgó la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética, donde se establece que se fijará como meta una

participación máxima del 65% de combustibles fósiles en la generación de energía eléctrica para el año 2024, del 60% en el 2035 y del 50% en el 2050 [5]. Este objetivo sólo puede ser alcanzado mediante el desarrollo de la investigación de las fuentes de energía renovable disponibles en cada región. En las zonas costeras, como el sur del Golfo de México; el potencial energético de las olas se perfila como uno de los pilares para el aprovechamiento de estas energías.

Casi toda la energía que existe en el planeta proviene del Sol [6] y las olas en los océanos no son la excepción. Al calentar éste la superficie de la Tierra de manera no uniforme, se da lugar a la formación del viento y éste a su vez, al viajar a través de la superficie de los vastos océanos, da origen a las olas [7]. A diferencia de la energía solar y eólica, la energía undimotriz es más predecible, persistente y espacialmente concentrada [8]; y se estima que hay entre 1 y 10 TW disponibles en los océanos del mundo [9] y de esta cantidad, entre el 10% y 25% puede ser transformada en electricidad [10]. Sin embargo a pesar de todas las ventajas que representa, la energía oceánica no está tan desarrollada como el resto de fuentes de energía alternativa [11] y es por ello que su comercialización a gran escala es prácticamente inexistente. Pese a ello la investigación acerca de ella se ha intensificado en los últimos años dando como resultado algunos proyectos en los que se operan en condiciones de mar abierto dispositivos extractores experimentales de energía de las olas a escala real (WEC, por sus siglas en inglés) [12, 13], como el realizado por [14] quien propone un convertidor de columna de agua oscilante.

Alrededor del mundo se han realizado estudios sobre el potencial energético de las olas, en países como España [15,16,17,18], Portugal [19,20], Italia [21,22], Corea [23], China [24], Irán [25], Australia [26] y Estados Unidos [27,28] por mencionar algunos; y también estudios donde se realiza esta misma evaluación a escala mundial [29,30,31], en estos últimos estudios el Golfo de México es una región considerada con un potencial energético oceánico de alrededor de 80 TWh/año [32]. El objetivo de este trabajo es evaluar el potencial energético en el sur del Golfo de México para la posible explotación del recurso energético oceánico.

## 2. Área de estudio y datos

### 2.1. Área de estudio



Figura 1. Coatzacoalcos, Veracruz. México  
Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI, 2014.



Figura 2. Posición geográfica de la base de datos  
Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI, 2014.

El Golfo de México es una cuenca oceánica, contenida entre los litorales de México, Estados Unidos de América y Cuba, como se muestra en la Fig. 1, la cual ha sido elaborada con datos de [33]. En la parte mexicana del Golfo de México se encuentran las costas de los siguientes estados: Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Campeche y Yucatán abarcando 3294 km, aproximadamente [34]. Ya que el aprovechamiento de los recursos depende de su disponibilidad, se piensa en Coatzacoalcos como un lugar donde se puede llevar a cabo esta investigación. Localizado en la costa sur del estado de Veracruz, México; está situado en las coordenadas geográficas 18°08'56"N, 94°24'41"W. Por su ubicación geoestratégica, tiene una trascendental participación en el Sistema Portuario Nacional, al representar la ruta más corta para interconectar el Océano Atlántico con el Océano Pacífico.

El estudio realizado por [35] determinó el régimen medio de oleaje en la desembocadura del río León donde se encontró que el oleaje de fondo tiene poca influencia en el oleaje al interior, es por ello que se seleccionó la desembocadura del río Coatzacoalcos, con una longitud de 2.3 km, como se observa en la Fig. 2 (elaborada con datos de [33]), la cual es un punto accesible a la conexión a la red eléctrica. La profundidad local es de alrededor de 15 m a 1.6 km de la costa en condiciones promedio de alta mar y baja mar [36].

### 2.2. Fuente de datos de oleaje

Existen dos fuentes de datos disponibles para la costa de Coatzacoalcos. La primera de ellas proviene de un sistema de predicción desarrollado en la Universidad de Carolina del Sur (UCS) con registros en un periodo de 41 años (1970-2011). El modelo que utiliza proviene del XtideProgram [37]. Los datos se presentan de forma horaria, por lo que cuenta con 359400 registros de oleaje en un solo punto.

La segunda fuente de datos es provista por el predictor de oleaje del Grupo Interacción Océano Atmósfera, de la Facultad de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) [38], éste contiene

registros de altura y periodo para todo el Golfo de México. El predictor utiliza el modelo WAVEWATCH III, un modelo de tercera generación creado por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés), el Servicio Meteorológico Nacional (NWS, por sus siglas en inglés) y el Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP, por sus siglas en inglés), todas agencias gubernamentales de Estados Unidos de América. Esta base de datos tiene zonas en las que coincide con el área de estudio de la primera fuente de este trabajo. Ambas fuentes presentan los datos de forma horaria registrando la altura y el periodo.

Los datos se agruparon para describir las condiciones anuales, mensuales y estacionales, en donde invierno fue definido entre los meses diciembre-febrero; primavera marzo-mayo; verano junio-agosto y otoño septiembre-noviembre.

### 3. Metodología

Un conjunto estadístico fue obtenido para cada rango temporal. Este conjunto incluye máximos, mínimos, promedio, desviación estándar y mínimos cuadrados.

La energía contenida en las olas de mar está definida por la energía de cada partícula ( $E_w$ ) en ella [39], como se muestra en la ec. 1, conformada por la energía cinética ( $E_C$ ) y la energía potencial ( $E_P$ )

$$E_w = E_C + E_P = \frac{\rho g}{8} H^2 \quad (1)$$

donde  $\rho$  es la densidad del agua de mar,  $g$  es la aceleración gravitacional y  $H$  es la altura ola. Dicha relación varía dependiendo las características del oleaje, la ubicación geográfica y la batimetría del área estudiada.

Cuando en un análisis del recurso energético del oleaje se prioriza la densidad de probabilidad de la distribución de energía o espectro energético de las olas [27], se añaden nuevas variantes como la dirección y la velocidad de estas, cuya expresión de la energía de la ola ( $J_{ij}$ ) se ve reflejada en la ec. 2.

$$J_{ij} = \rho g C_{g,i} S_{ij} \quad (2)$$

donde  $C_{g,i}$  es la velocidad del grupo de olas y  $S_{ij}$  es el espectro energético de la ola.

Otra aproximación que puede usarse la establecen [16,39] y se representa en la ec. 3.

$$P = \delta H_s^2 T_e \quad (3)$$

donde  $P$  es la potencia de la ola,  $\delta$  es la variable representativa del espectro energético de la ola,  $H_s$  es la altura significativa de la ola y  $T_e$  es el periodo energético.

Además de estas aproximaciones, existen ecuaciones que describen el comportamiento de la energía de las olas si se encuentran en aguas profundas o someras. En [31] se plantea que para una zona donde se cumpla la condición  $h > L/2$  se considerará como aguas profundas; donde  $h$  es la profundidad local y  $L$  es la longitud promedio de las olas (longitud de onda)

No obstante, la longitud de onda no puede ser obtenida directamente en las mediciones de oleaje, [31] propone la ec. 4 para determinarla, utilizando la relación directa que existe entre la longitud de onda y el periodo:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (4)$$

donde  $L$  es la longitud de onda del oleaje,  $g$  es la aceleración gravitacional, y  $T$  el periodo. El periodo promedio anual para el punto seleccionado es de 4.3 segundos, utilizando la Ec. 4, el resultado para  $L$  es de 28.83 metros. La profundidad local considerada para el sitio donde se realiza el muestreo es de 15 metros, con lo cual la condición de profundidad se cumple y por lo tanto, en este estudio se utilizará la aproximación del cálculo de potencia en aguas profundas.

El cálculo de potencia para olas regulares en aguas profundas en kW/m [41,42], se obtiene por la ec. 5.

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_e \quad (5)$$

El periodo energético  $T_e$  es definido como una función del momento espectral caracterizada por la ec. 6.

$$T_e = \frac{m_{-1}}{m_0} \quad (6)$$

donde  $m_{-1}$  y  $m_0$  son coeficientes derivados del espectro energético de la ola que muestran la variación de la misma, cuya aproximación se realiza también a través del periodo promedio [42] mediante la ec. 7

$$T_e = \gamma T_p \quad (7)$$

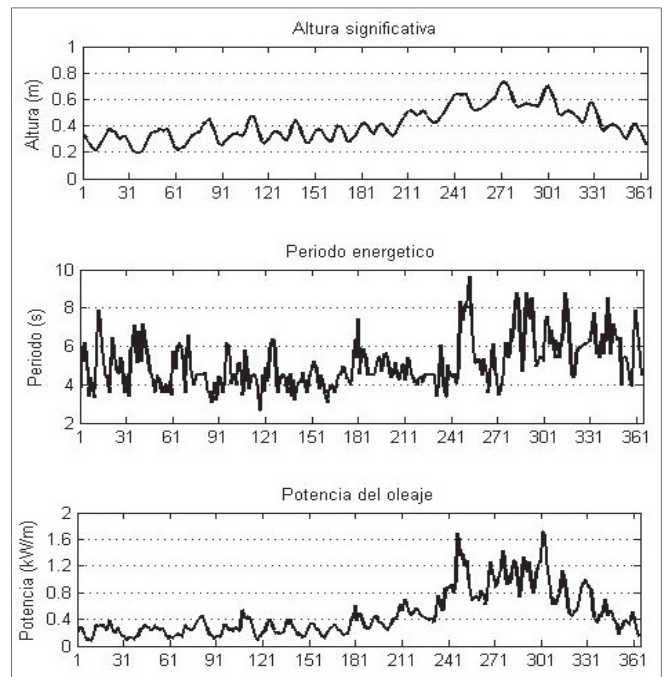


Figura 3. Comportamiento del oleaje a lo largo del año.  
Fuente: Elaboración propia con datos de UCS y UNAM, 2013.

donde  $T_p$  es el periodo promedio y  $\gamma$  es un coeficiente que depende de la forma del espectro energético de la ola, cuyo valor oscila entre 0.8 y 1, la aproximación utilizada en este trabajo, como lo hecho en [16,31,42], será de  $\gamma = 0.9$ , que es equivalente al que se obtiene mediante el programa JONSWAP.

#### 4. Análisis y cuantificación de la energía disponible

Utilizando la ec. 5 se obtuvieron los datos de potencia cada hora. Con la finalidad de observar las tendencias en la distribución de la potencia, el periodo energético y la altura significativa de las olas, se graficaron los resultados obtenidos. Para optimizar el análisis de los datos, se consideraron varias escalas temporales, anual, semestral, mensual, diaria y horaria, estas escalas se proponen para obtener un solo valor, una medida conveniente de variabilidad bajo el dominio del tiempo con el fin de identificar la energía de las olas. En la Fig. 3 se presentan los resultados del análisis anual, en el que se muestran los resultados de las potencias cada día en kW/m. También se incluyeron las gráficas de la altura significativa y periodo energético para observar la relación que existe entre ambas.

Se puede apreciar que existe un incremento notable en la potencia durante la segunda mitad del año, cuyo comportamiento es muy similar al que muestra el periodo energético en ese periodo. Por otra parte, a pesar de que existen incrementos significativos del periodo energético en el comienzo del año, la potencia parece ser más influenciado por la altura del oleaje. El valor máximo anual ocurre el 29 de Octubre con una potencia de 1.713 kW/m, mientras que el valor mínimo anual se presenta el 10 de Enero con una potencia de 0.078 kW/m. En la Figura 3 se muestra una marcada tendencia de incremento del flujo energético durante la segunda mitad del año.

De este análisis se obtuvo también que la potencia media anual estimada es de 0.56 kW/m.

##### 4.1. Variabilidad Temporal

Es necesario mencionar también que para evaluar el potencial energético del oleaje no sólo deben tomarse en cuenta la magnitud de los picos registrados. La variabilidad del flujo energético es un aspecto fundamental para determinar si es viable o no, la posibilidad de aprovechar la energía que albergan las olas. Sitios con un flujo energético moderado y estable han demostrado ser más atractivos que sitios donde este flujo es mayor, pues en estos últimos existe mayor inestabilidad y por lo tanto, es menos confiable. La cantidad de energía disponible en los mares que se ubican en latitudes altas en ambos hemisferios tiende a caracterizarse por tener una gran variabilidad estacional, en contraste con las zonas cercanas al ecuador, donde el flujo energético permanece estable durante el año [30] de esto se puede enunciar una hipótesis donde la distribución estacional energética del oleaje difiere según su posición geográfica. Las mayores variaciones estacionales que ocurren fuera de los polos se encuentran en el Mar Árabe y en la costa sur del mar de China [31].

Para determinar esta estabilidad es fundamental mostrar el potencial energético disponible en diferentes escalas

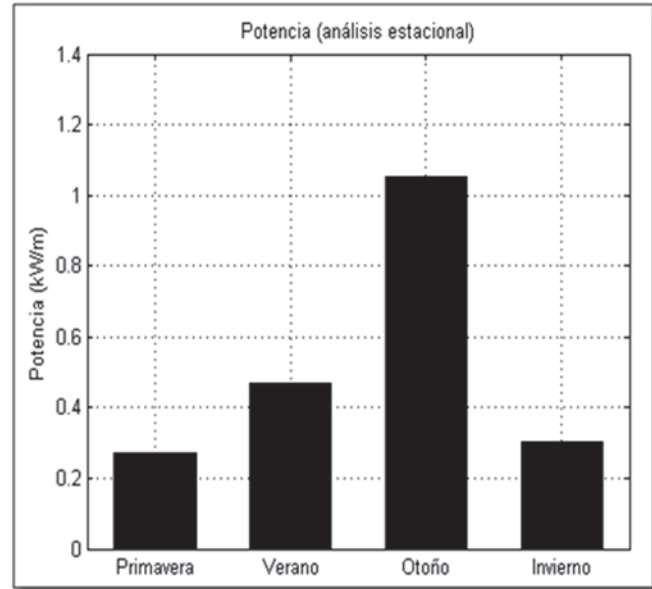


Figura 4. Estimación de la energía por estaciones

Fuente: Elaboración propia con datos de UCS y UNAM, 2013.

temporales [43]. Con el objetivo de evaluar estas escalas temporales, Cornnett propone dos coeficientes para describir la variabilidad temporal del potencial energético de las olas en un punto: el índice de variabilidad estacional ( $SV$ ) y el índice de variabilidad mensual ( $MV$ ) [31].

Tras haber obtenido el potencial energético utilizando la ec. 5, los resultados se agruparon con sus respectivas escalas temporales. Para apreciar mejor el comportamiento del flujo energético se graficaron los resultados.

##### 4.1.1. Análisis Estacional

El análisis estacional  $SV$  muestra de manera puntual el flujo energético en cada estación durante el año. La gráfica es mostrada en la Fig. 4, y como se puede apreciar, es menos descriptiva que la gráfica del análisis anual, sin embargo es necesaria; ya que, como se mostrará más adelante, proporciona los datos que se requieren para calcular el  $SV$ .

En la Fig. 4 se presenta la potencia estimada para cada una de las estaciones del año en el área de estudio. La potencia media en otoño es de 1.05 kW/m y es la estación con un mayor flujo energético; seguida de verano con 0.466 kW/m. Después está invierno con 0.301 kW/m y por último, la estación menos energética es primavera con 0.26 kW/m.

El índice de variabilidad estacional  $SV$  está definido en la ec. 9.

$$SV = \frac{P_{S1} - P_{S4}}{P_{year}} \quad (8)$$

donde  $P_{S1}$  es la potencia media de la estación más energética del año,  $P_{S4}$  es la potencia media de la estación menos energética del año y  $P_{year}$  es la potencia media anual.

Utilizando la ec 8, se obtiene  $SV = 1.41$ . Este valor indica una variabilidad estacional moderada, siendo  $SV = 0$  una variabilidad ideal; y  $SV = 3$  la mayor variabilidad registrada [31].

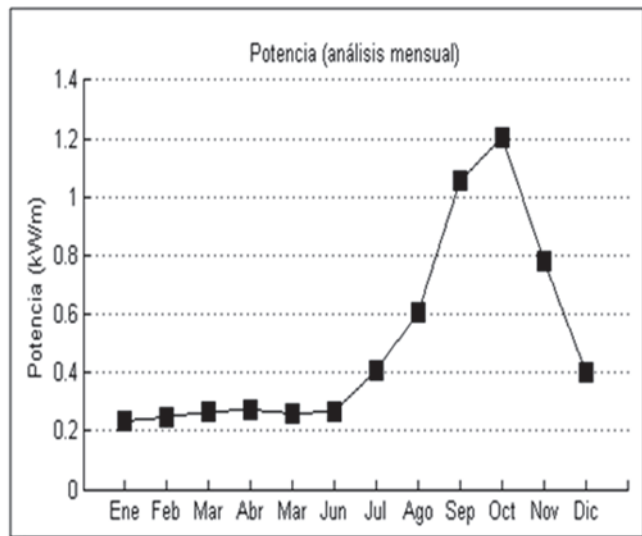


Figura 5. Estimación de la energía media mensual.  
Fuente: Elaboración propia con datos de UCS y UNAM, 2013.

#### 4.1.2. Análisis Mensual

El análisis mensual ofrece una perspectiva más detallada sobre cómo evoluciona el comportamiento del flujo energético a lo largo del año. A diferencia del análisis estacional, en el que solamente se observan de manera puntual las estaciones del año en las que hay más o menos energía disponible, en el análisis mensual se puede observar dónde comienza a presentarse un incremento considerable en la energía undimotriz e igualmente identificar dónde decrece. En la Fig. 5 se presentan los resultados obtenidos del cálculo de la potencia estimada para cada mes del año. En ella se observa que durante el mes de junio (verano) comienza a aumentar la energía disponible, hasta llegar a su punto máximo en octubre (otoño) con una potencia media de 1.206 kW/m, después de alcanzar este máximo, decrece hasta llegar a su punto mínimo en enero (invierno) cuya potencia media es de 0.233 kW/m.

El índice de variación mensual  $MV$  está definido por la ec. 9.

$$MV = \frac{P_{M1} - P_{M12}}{P_{year}} \quad (9)$$

donde  $P_{M1}$  es la potencia media del mes más energético del año,  $P_{M12}$  es la potencia del mes menos energético del año y  $P_{year}$  es la potencia media anual.

Utilizando la ec. 9 se obtiene  $MV = 1.74$ , que también indica una variabilidad moderada con  $MV = 0$  considerada una variabilidad ideal y  $MV = 3.6$  la mayor variabilidad registrada [31].

## 5. Resultados y Discusión

Este estudio se realizó con la finalidad de dar a conocer y cuantificar el potencial energético del oleaje en la costa sur del Golfo de México. Los resultados muestran que en la zona estudiada el recurso energético es algo menor que otros sitios

investigados [15-28]. Este estudio ha permitido definir variables importantes en el comportamiento del oleaje para el Golfo de México, como el coeficiente de Variación Estacional,  $SV = 1.41$ , que es equiparable a los índices que se pueden obtener de los estudios del potencial energético de las olas realizados en España [16-18], Corea [23] y en Estados Unidos de América [27], lo cual, realiza un aporte a la investigación de la energía undimotriz en el mundo. Igualmente el coeficiente de Variación Mensual,  $MV = 1.74$ , es también muy cercano a los índices que se pueden obtener de los estudios del potencial energético de las olas realizados en Italia [22], Corea [23] y en Estados Unidos de América [32], corroborando la elección de la metodología presentada.

Adicionalmente, se observó algo interesante en el comportamiento de la energía a lo largo del año. En la Figura 4, se presenta la distribución estacional energética del oleaje; ahí se observa que la estación más energética es otoño y la de menor potencial energético es primavera, lo cual difiere de la tendencia mundial, porque usualmente la estación con mayor potencial energético es invierno y la menos energética es verano [15-17,20,30-31]. Este hecho es, sin duda relevante, pues demuestra que este tipo de energía puede complementar estacionalmente otras fuentes de energía renovable como la solar donde el mayor recurso disponible está en verano y por tanto esto abre nuevas perspectivas para el aprovechamiento del potencial energético del oleaje en el país.

## Agradecimientos

Los autores agradecen por la disponibilidad de los datos a la Universidad de Carolina del Sur, al Grupo Interacción Océano Atmósfera de la Facultad de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos de América (NOAA, por sus siglas en inglés). Así como, un agradecimiento especial al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACyT) por el apoyo económico otorgado a través de la beca del Sistema Nacional de Investigadores (SNI).

## Referencias

- [1] IEA, International Energy Outlook, [on line]. [Consulta 4 de abril de 2013]. Disponible en: [www.iea.org](http://www.iea.org).
- [2] Hernández-Escobedo, Q., Manzano-Agugliaro, F. and Zapata-Sierra, A., The wind power of Mexico. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (9), pp. 2830-2840, 2010. DOI:10.1016/j.rser.2010.07.019
- [3] Hernández-Escobedo, Q., Saldaña-Flores, R., Rodríguez-García, E.R. and Manzano-Agugliaro, F., Wind energy resource in Northern Mexico. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, pp. 890-914, 2014. DOI: 10.1016/j.rser.2014.01.043
- [4] Verdieck, J., México: Renewable Energy. U.S. Commercial Service. 2008.
- [5] LAER, Ley de Aprovechamiento de Energías Renovables. México. 2008.
- [6] Cruz-Peragon, F., Palomar, J.M., Casanova, P.J., Dorado, M.P. and Manzano-Agugliaro, F., Characterization of solar flat plate collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (3), pp. 1709-1720, 2012. DOI:10.1016/j.rser.2011.11.025
- [7] Brooke, J., Wave Energy Conversion. 1ª Ed. Oxford: Elsevier, 187P. 2003.

- [8] Falnes, J., A review of wave-energy extraction. *Marine Structures*, 20 (4), pp. 185-201, 2007. DOI:10.1016/j.marstruc.2007.09.001.
- [9] Panicker, N.N., Power resource estimate of ocean surface waves. *Ocean Eng.* 3 (6), pp. 429-434, 1976. DOI:10.1016/0029-8018(76)90016-0.
- [10] Cruz, J., *Ocean wave energy: Current status and future perspectives*. 1<sup>ra</sup> Ed., Bristol, Springer-Verlag: Berlin Heidelberg, 2008.
- [11] Manzano-Agugliaro, F., Alcayde, A., Montoya, F.G., Zapata-Sierra, A. and Gil, C., Scientific production of renewable energies worldwide: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, pp. 134-143, 2013. DOI:10.1016/j.rser.2012.10.020
- [12] Pahlá, A., Mendes, L., Fortes, C.J., Brito-Melo, A. and Sarmiento A., The impact of wave energy farms in the shoreline wave climate: Portuguese pilot zone case study using Pelamis energy wave devices. *Renewable Energy*, 35 (1), pp. 62-77, 2010. DOI:10.1016/j.renene.2009.05.025
- [13] Dalton, G.J., Alcorn, R. and Lewis, T., A 10 year installation program for wave energy in Ireland: A case study sensitivity analysis on financial returns. *Renewable Energy*, 40 (1), pp. 80-89, 2012. DOI:10.1016/j.renene.2011.09.025
- [14] Borrás-Formoso R., Ferreiro-García, R., Miguélez-Pose, F. and Fernández-Ameal, C., Making use of coastal wave energy: A proposal to improve oscillating water column converterst. *DYNA*, 81 (185), pp. 211-218, 2014. DOI:10.15446/dyna.v81n185.38572
- [15] Iglesias, G., López, M., Carballo, R., Castro, A., Fragueta, J. and Frigaard, P., Wave energy potential in Galicia (NW Spain). *Renewable Energy*, 34 (11), pp. 2323-2333, 2009. DOI:10.1016/j.renene.2009.03.030
- [16] Sierra, J.P., González-Marco, D., Sospedra, J., Gironella, X., Mösso, C. and Sánchez-Arcilla, A., Wave Energy resource assessment in Lanzarote (Spain). *Renewable Energy*, 56, pp. 480-489, 2013. DOI:10.1016/j.renene.2013.01.004
- [17] Iglesias, G. and Carballo, R., Offshore and inshore wave energy assessment: Asturias (N Spain). *Energy*, 35 (5), pp. 1964-1972, 2010. DOI:10.1016/j.energy.2010.01.011
- [18] Montoya, F.G., Aguilera, M.J. and Manzano-Agugliaro, F., Renewable energy production in Spain: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, pp. 509-531, 2014. DOI:10.1016/j.rser.2014.01.091
- [19] Mendes, R.P.G., Calado, M.R.A. and Mariano S.J.P.S., Wave energy potential in Portugal: Assessment based on probabilistic description of ocean waves parameters. *Renewable Energy*, 47, pp. 1-8, 2012. DOI:10.1016/j.renene.2012.04.009
- [20] Rusu, L. and Guedes-Soares, C., Wave energy assessments in the Azores islands. *Renewable Energy*, 45, pp. 183-196, 2012. DOI: 10.1016/j.renene.2012.02.027
- [21] Vicinanza, D., Contestabile, P. and Ferrante, V., Wave energy potential in the north-west of Sardinia (Italy). *Renewable Energy*, 50, pp. 506-521, 2013. DOI: 10.1016/j.renene.2012.07.015.
- [22] Liberti, L., Carillo, A. and Sannino, G., Wave energy resource assessment in the Mediterranean, the Italian perspective. *Renewable Energy*, 50, pp. 938-949, 2013. DOI:10.1016/j.renene.2012.08.023
- [23] Kim, G., Jeong, W.M., Lee, K.S., Jun, K. and Lee, M.E., Offshore and nearshore wave energy assessment around the Korean Peninsula. *Energy*, 36 (3), pp. 1460-1469, 2011. DOI: 10.1016/j.energy.2011.01.023
- [24] Zhang, D., Li, W. and Lin, Y., Wave energy in China: Current status and perspectives. *Renewable Energy*, 34 (10), pp. 2089-2092, 2009. DOI: 10.1016/j.renene.2009.03.014
- [25] Saket, A. and Etemad-Shahidi, A., Wave energy potential along the northern coasts of the Gulf of Oman, Iran. *Renewable Energy*, 40 (1), pp. 90-97, 2012. DOI:10.1016/j.renene.2011.09.024
- [26] Hughes, M.G. and Heap, A.D., National-scale wave energy resource assessment for Australia. *Renewable Energy*, 35 (8), pp. 1783-1791, 2010. DOI:10.1016/j.renene.2009.11.001
- [27] Lenee-Bluhm, P., Paasch, R. and Özkan-Haller, H.T., Characterizing the wave energy resource of the US Pacific Northwest. *Renewable Energy*. *Renewable Energy*, 36 (8), pp. 2106-2119, 2011. DOI:10.1016/j.renene.2011.01.016
- [28] García-Medina, G., Özkan-Haller, H.T. and Ruggiero, P., Wave resource assessment in Oregon and southwest Washington, USA, *Renewable Energy*, 64, pp. 203-214, 2014. DOI:10.1016/j.renene.2013.11.014
- [29] Gunn, K. and Stock-Williams, K., Quantifying the global wave power resource. *Renewable Energy*, 44, pp. 296-304, 2012. DOI:10.1016/j.renene.2012.01.101
- [30] Arinaga, R.A. and Cheung, K.F., Atlas of global wave energy from 10 years of reanalysis and hindcast data. *Renewable Energy*, 39 (1), pp. 49-64, 2012. DOI:10.1016/j.renene.2011.06.039
- [31] International Offshore and Polar Engineering Conference, A global wave energy assessment, Canada, International Society of Offshore and Polar Engineers, LXXX, Vancouver, Canada, pp. 1-9, 2008.
- [32] Jacobson, P., Mapping and assessment of the United States ocean wave energy resource. EPRI, Palo Alto, CA: 2011. 1024637.
- [33] INEGI, Instituto Nacional de Geografía y Estadística. [online]. [consultado octubre 2013]. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/default.aspx>
- [34] Environmental Protection Agency. General facts about the Gulf of Mexico. [online]. [consultado marzo 2014]. Aviable at: <http://www.epa.gov/gmpo/about/facts.html>
- [35] Alvarez-Silva, O., Osorio, A. and Gómez-Giraldo, A., Determination of the wave mean regime in the mouth of Leon river. *DYNA*, 79 (173), pp. 95-102, 2012.
- [36] SEMAR, Datos Generales del Puerto, [online]. [consultado octubre 2013]. Disponible en: [www.semar.gob.mx](http://www.semar.gob.mx)
- [37] University of South Carolina. WWW Tide and Current Predictor. [online]. [consultado junio 2013]. Disponible en: <http://tbone.biol.sc.edu/tide/index.html>
- [38] Grupo Interacción Océano Atmósfera. Pronósticos operativos para la República Mexicana. [online]. [consultado enero 2014]. Disponible en: [http://grupo-ia.atmosfera.unam.mx/pronostico\\_wrf/](http://grupo-ia.atmosfera.unam.mx/pronostico_wrf/).
- [39] Rodríguez, R., Ricci, P., Marón, A., Prieto, M.E., Fernández, D. and Taboada, M., Diseño y ensayos del sistema de fondeo de un convertidor de energía de las olas. *Canal de experiencias hidrodinámicas*, 209, pp. 1-31, 2008.
- [40] Instituto Tecnológico de Canarias, Identificación y caracterización del potencial de la energía de las olas en Canarias., España, s.a.
- [41] Chiu, F., Huang, W. and Tiao, W., The spatial and temporal characteristics of the wave energy resources around Taiwan. *Renewable Energy*, 52, pp. 218-221, 2013. DOI: 10.1016/j.renene.2012.10.029
- [42] Mirzaei, A., Tangang, F. and Juneng, L., Wave energy potential along the east coast of Peninsular Malaysia. *Energy*, 68, pp. 722-734, 2014. DOI: 10.1016/j.energy.2014.02.005
- [43] Hagerman, G., Southern New England wave energy resource potential building energy 2001, Tufts University, Boston, 2001.

**A.I. González-Carrillo**, received the BSc. Eng in Mechanical Electric Engineering in 2014. Currently, he is a research collaborator in the Faculty of Engineering, Universidad Veracruzana, Minatitlán, México.

**R. Ruiz-Cabrera**, received the BSc. Eng in Mechanical Electric Engineering in 2014. Currently, he is a research collaborator in the Faculty of Engineering, Universidad Veracruzana, Minatitlán, México.

**Q. Hernández-Escobedo**, is PhD., professor at Universidad Veracruzana, Minatitlán, México, joined the faculty of engineering in 2011. His research group uses both thermodynamic and physic simulated systems. Much of his work focuses on wind, solar and oceanic energy applications, particularly forecasting, modeling and assessing climate change impacts on renewable resources. Previously, Dr. Hernández-Escobedo was a scientist at Instituto de Investigaciones Eléctricas in México. He designed and led wind energy projects, as well as solar and oceanic projects.  
ORCID <http://orcid.org/0000-0002-2981-7036>

**A. Fernández-García**, received the BSc. Eng in Industrial Engineering in 2004, from the University of Málaga, Spain, the MSc. degree in Solar Energy in 2007, from the University of Almería, Spain and the PhD degree in Environmental Engineering in 2013, she has developed her research activity in CIEMAT-PSA since 2002, with emphasis on small-sized parabolic-trough

collectors for industrial applications and optical measurement and durability of solar reflectors for Concentrating Solar Power plants. Currently, she is the Coordinator of the laboratories for optical characterization and durability testing of solar reflectors at the PSA.

ORCID <http://orcid.org/0000-0001-6044-4306>

**F. Manzano-Agugliaro**, received the BSc. Eng in Engineering in 1995, from the University of Cordoba, Spain, and the PhD degree in Geomatics Engineering in 1999. He has developed his research and teach activity in University of Almeria, Spain since 1996, in geomatics and engineering multidisplinary. He was Senior Lecturer from 2000 to 2011, and Professor from 2011 at Engineering Dpt. of University of Almeria, Spain. Currently, he is the Coordinator of the Engineering PhD. program of University of Almeria, Spain.

ORCID <http://orcid.org/0000-0002-0085-030X>



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN  
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Medio Ambiente

Oferta de Posgrados

Especialización en Aprovechamiento de  
Recursos Hidráulicos

Especialización en Gestión Ambiental

Maestría en Ingeniería Recursos Hidráulicos

Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo

Doctorado en Ingeniería - Recursos Hidráulicos

Doctorado Interinstitucional en Ciencias del Mar

Mayor información:

E-mail: [acia\\_med@unal.edu.co](mailto:acia_med@unal.edu.co)  
Teléfono: (57-4) 425 5105

# Impact of previous acclimatization of biomass and alternative substrates in sunflower oil biodegradation

Pedro Cisterna-Osorio <sup>a</sup>, Antonio Gutiérrez Lavin <sup>b</sup> & Herminio Sastre-Andres <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Universidad del Bio Bio, Concepción, Chile. [pcisterna@ubiobio.cl](mailto:pcisterna@ubiobio.cl)

<sup>b</sup> Universidad de Oviedo, Oviedo, España. [agl@uniovi.es](mailto:agl@uniovi.es)

Received: September 23<sup>th</sup>, 2014. Received in revised form: May 13<sup>th</sup>, 2015. Accepted: August 11<sup>th</sup>, 2015.

## Abstract

The aim of this work is to evaluate the incidence rate of the previous acclimatization of biomass and the presence of any other easily biodegradable substrates, such as sucrose. This experiment will be undertaken with sunflower oil biodegradation in a batch reactor with suspended biomass. It used a biomass concentration of 5000 mg/l in batch reactors, and in every condition the elimination of oil by means of biodegradation was achieved with levels ranging from 10 to 90 %. It was noticed that sludge acclimation substantially improves biodegradation efficiency by increasing the average biodegradation from a value of 30% to 80%. When adding sucrose to an acclimatized biomass stage, biodegradation sunflower oil is reduced, from an average value of 80% to 60%.

**Keywords:** Biodegradability; Fat and oils; Acclimatization.

# Incidencia de la aclimatación previa de la biomasa y sustrato alternativo en la biodegradación de aceite girasol

## Resumen

El objetivo de este trabajo es evaluar la incidencia de la aclimatación previa de la biomasa y la presencia de otro sustrato, de fácil biodegradación como es la sacarosa, sobre la biodegradación del aceite girasol en un reactor discontinuo con biomasa en suspensión. Se trabajó con concentraciones de biomasa del orden de los 5000 mg/l en los reactores discontinuos y en todas las condiciones se logró eliminar aceite por la vía de la biodegradación desde niveles que van de un 10% hasta un 90% aproximadamente y observándose que la aclimatación de los lodos mejora sustancialmente la eficiencia de biodegradación aumentando la biodegradación promedio de un 30% a un valor de 80% y al agregar sacarosa en un escenario de biomasa aclimatada se reduce la biodegradación del aceite girasol, de un valor medio de 80% a un 60%.

**Palabras-clave:** Biodegradabilidad, Grasas y Aceites, Aclimatación.

## 1. Introduction

Fats and oils are an important component in both domestic wastewater and some types of industrial wastewater. The amount of lipids in municipal wastewater is approximately 30 to 40% of the organic matter, which is measured as Oxygen Chemical Demand [14].

However, the exact behavior of lipids in these processes is not well understood. The literature generally states that lipids and fatty acids are removed by biological treatment methods that inhibit microbial growth, and cause foam

formation, which is the growth of filamentous bacteria and floating floc [9].

Currently, Flotation is used in the separation of immiscible fluids or fluids, while solids are increasingly used in sewage treatment. There are three different types of flotation characterized by the use of air at atmospheric pressure, dissolved air and induced air. The difference lies in the way of introducing air into the wastewater [28].

Physico-chemical treatment is applied to highly emulsified and dispersed systems, and the size of fat particles is less than 20 microns. It has been found that when using a

DAF system to treat waters in the oil industry the efficiency of the process increases from 50% to 88% [13] with the addition of chemicals. A more recent alternative, electro coagulation, has shown high effectiveness in destabilizing such emulsions and the subsequent removal of oils and fats [7].

As for the biodegradability of fats and oils, there is generic information on which of these are classified as slowly biodegradable substances. As for their degradations, cells initially save these substances on their cytoplasm and later, through an enzymatic process, they perform hydrolysis to produce an assimilable substrate that can be biodegraded [27]. The results of the biodegradability obtained were between 0 and 40 % for mineral oils and from 60 to 90% [8] for vegetable oils and diesters.

This research studies the biodegradation of sunflower oil, for which tests are carried out in a discontinuous system with a behavior that approaches suspended biomass. The sunflower oil choice was based on the following criteria:

- It is the most frequent oil used in Chile.
- It is a product that is easy to access as well as being a standardized one.

Among the oils supplied in Chile, the most common is fish oil, and to a lesser extent, sunflower oil, canola and corn.

Many of the crude oils are imported, mainly soybean and sunflower [12].

Sunflower oil removal by means of biodegradation in a batch type reactor was studied and a comparative analysis of the behavior of sunflower oil biodegradation with acclimated and non-acclimated sludge was undertaken.

Other experiments that added sucrose as a different substrate were also undertaken as this provides competition phenomena that must be taken into account.

It is known that oils are formed by the condensation of glycerol and fatty acids.

## 1.2. Biological treatment of oils and fats

The specific problem of fatty and oily influent in the activated sludge treatment (the most commonly used method) is related to the release of free fat in the aeration stage. This limits and reduces the BOD5 removal during the early stage and also floating floc in the clarification stage.

Anaerobic treatment is commonly preferred to treat strong effluent with high organic content, in which fat and oil are the most common substrates from the food industries. The assessment for treatment usage is usually based on factors such as cost of aeration, sludge treatment, and disposal, etc.

Table 1.  
Fatty acids that constitute sunflower oil [3].

| String Type    | Common Name | Percentage |
|----------------|-------------|------------|
| C16            | Palmitic    | 6,5        |
| C18            | Stearic     | 5,0        |
| C20            | Arachidic   | 0,5        |
| C18:1(9)       | Oleic       | 23         |
| C18:2(9,12)    | Linoleic    | 63         |
| C18:3(9,12,15) | Linolenic   | 0,5        |
| C20:1(3)       | Arachidonic | 1          |

Source: Adapted from Belitz, H.D. and Grosch, W., Química de los alimentos, 1997.

It is presumed that these meet the requirements of organic matter in the effluent. This consideration is important for the selection of an appropriate treatment technology [15].

Regardless of which type of biological treatment is chosen, acclimatization of degrading biomass and the presence of other substrates affect the biodegradation of fats and oils.

The composition and the particle substrate's size also determine the hydrolysis and biodegradation speed and mechanism in wastewater treatment system [24].

There have been some experiences, when treating industrial effluents vegetable oil, of anaerobic treatment preceded by aerobic treatment having been applied. These processes are affected by several problems such as the development of micelles, and the excess of biomass due to a high coefficient of performance, etc. Therefore, the addition of a physicochemical pretreatment, implemented to selectively remove biorefractory organics before anaerobic treatment has been implemented, yielding satisfactory results [30].

The process of biodegradation of fats and oils requires the involvement of enzymes in the hydrolysis. Enzymes are proteins which act as catalysts during reactions. They have the particular characteristic that is used for a specific reaction and specific substrate type. Typically the degree of specificity of an enzyme is associated with the biological role played. [22].

Hydrolysis begins with the biodegradation of fats and oils. This refers to the breakdown of the primary organic substrate present in the original wastewater into smaller products that can be captured and subsequently biodegraded by bacteria [33].

Microbial enzymes catalyze three reactions types: Hydrolitic, Oxidatives and those of synthesis. The hydrolytic enzymes are used to hydrolyze insoluble complex compounds on simple components that are able to pass through the cellular membrane by diffusion.

These enzymes can act outside the cell wall, meaning that they can be intracellular or extracellular enzymes, such as oxirreductasas, which operate within the cell [26].

These enzymes can act outside the cell wall, and they can be intracellular or extracellular enzymes, such as oxirreductasas, which operate within the cell

Fats and oils are attacked by a wide range of organisms in a process in which extracellular enzymes called lipases are used to free fatty acids [20]. In this case the fatty acids can be biodegraded by a broader range of microorganisms. Those that do not produce lipolitic extracellular enzymes are also included in the process [25].

One of the tools that is most commonly used is the acclimatization of biomass, a procedure which allows the pollutants to be removed biologically. [26]. Due to the complex nature of the sensitive microbial ecosystems, they dynamically provide answers regarding environmental conditions such as temperature, pH, availability and substrates type. [26].

In this context, acclimatization it is associated with a type of substrate that is to be used as an energy source; therefore, biomass carries out the biodegradation thereof.

Also, in this context, the importance of the acclimatization of sludge to a type of substance that was

initially described as harmful is confirmed. When considering the existing literature, fats and oils are substances that do not favor the development and growth of bacterial colonies. As sludge is acclimatized for a considerable time to the new type of influent, it appears that the biomass adapted to it. This is explained by mutations, or changes caused by chemical or physical agents, which change the DNA and impart new features to the cell, thereby allowing the cell to degrade xenobiotic substances or ones that are a result of biodegradation. Spontaneous mutations occur in one of 10<sup>6</sup> cells. However, the DNA molecule is capable of auto-repeating [6].

In recent years, use has been made of commercial microbial supplements that are bioincreasers as they remove of fats and oils, and make a distinction between those with a variety of bacteria from those that contain a specified one [7].

The nature of organic, soluble or particulate substrates as well as the concentration of nutrients, which dissolve oxygen in the reactor and the organic load, and the sludge age are some of the main factors affecting competition [1].

Given the possibility that heterogeneous communities of bacteria simultaneously metabolize individual components of mixtures of carbon compounds, they are dependent on the concentration of the respective substrates [29].

Finally, in the case of mineral oils, the OECD current standards require both a knowledge of the chemical structure to calculate the theoretical value of the rate of oxygen consumption (OUR) and CO<sub>2</sub> evolution, and an experimental determination of the value for these parameters, which is closely associated with ecological impacts [5]. In fact, pollution from oil spills in marine ecosystems and reserves accelerates the repair of the damaged ecosystem through bioremediation techniques. These are based on the application of microbial metabolic activity to degrade petroleum hydrocarbons [2], which is also based on the principles of acclimatization.

## 2. Methodology

### 2.1. Batch Team

The batch reactors are beakers of 250 m, which are filled with bacterial biomass generated from the biodegradation of sucrose, which has a suspended solids concentration in the range of 4000 to 6000 mg/l as well as a stirring device.

### 2.2. Food Preparation

The batch reactor was fed with synthetic wastewater, prepared according to the typical characteristics of a strong urban wastewater [23] This has a COD of about 1000 mg/l, with the proportions of nitrogen and phosphorus, which are given by the COD: N: P=100:5:1. In addition to the carbonaceous substrates, potassium hydrogen phosphate and ammonium chloride were added.

### 2.3. Analytical Testing

Equipment and instruments used to determine the various parameters to characterize the wastewater were used. The

following parameters with their corresponding methods were measured:

- Total Suspended Solids (TSS),

TSS is determined by filtering a known volume of sample on Whatman 4.7 cm GF/C glass fiber filters and then drying it at 103-105°C. The difference in weight of the filter before and after filtration is used to calculate the content SST, 209C method [1].

- Fats and Oils

When determining the fats and oils, the Gravimetric Assay Soxhlet method is used, which quantifies substances with similar characteristics on the basis of their common solubility in an appropriate solvent, 213E method [1].

The experimental design of this work starts with a comparative experience, using acclimatized and non-acclimatized biomass, with different concentrations of TSS in an exploratory phase in order to verify the effect of acclimatization on the biodegradation of fats and oils.

In the second experiment, when working with the additional substrate –sucrose– in all scenarios, the same concentration of TSS was used with acclimatized and non-acclimatized biomass.

## 3. Results

The biodegradation sunflower oil tests were performed in an incubator at a temperature of 30°C and an agitation of 200 (rev/min).

### 3.1. Acclimated sludge

The results obtained are reported in terms of the biodegradation that is left by the removal of the oil type, 0.92 g, using two different concentrations of non-acclimatized biomass, 4000 and 6000 mg/l.

A relationship is observed between the levels of biodegradation and the time that the substrate remains in the reactor. This is a consequence of the specific features that the oil has in terms of its solubility and buoyancy. These features result in a random situation regarding the meeting of microorganisms with the oil molecules. It is observed that biodegradation levels range from 8% for 1 day to 43% for 4 days in terms of residence time, Table 2. The increase in biomass concentration is not a relevant factor.

In order to develop microbial wastewater treatment, contaminated edible oils were selected that contained microorganisms capable of quickly biodegrading edible oil. The screening study showed a co-culture of yeast strain that was comprised of *Rhodotorula pacifica* ST3411 and ST3412

Table 2.  
Oil Biodegradation in batch systems with acclimatization.

| Oil (g) | Vol. System (ml) | Conc. Sludge (mg/l) | Efficiency Biodegrade (%) | Period (day) |
|---------|------------------|---------------------|---------------------------|--------------|
| 0,92    | 225              | 6000                | 27                        | 2            |
| 0,92    | 225              | 6000                | 24                        | 3            |
| 0,92    | 210              | 4000                | 8                         | 1            |
| 0,92    | 210              | 4000                | 18                        | 2            |
| 0,92    | 210              | 4000                | 43                        | 3            |
| 0,92    | 210              | 4000                | 37                        | 4            |

Source: Authors' own.

Table 3. Oil Biodegradation in batch systems with acclimatization.

| Oil (g) | Oil remnant (g) | Vol. (ml) | Conc. Sludge (mg/l) | Effici. Biodeg. (%) | Period (day) |
|---------|-----------------|-----------|---------------------|---------------------|--------------|
| 0,92    | 0,037           | 225       | 5000                | 96                  | 3            |
| 0,92    | 0,295           | 225       | 5000                | 68                  | 2            |
| 0,92    | 0,37            | 225       | 5000                | 61                  | 1            |

Source: Authors' own.

strain *Cryptococcus laurentii*. The degradation rate in 24h 3,000 ppm of mixed oils (salad oil / butter / beef tallow, 1:01 w/w) at 20°C was 39.8%. Faster degradation was observed at 20°C and pH 8. In a larger scale experiment, the salad oil was rapidly degraded by a cocultivation of 67152.0 to 14396.7 ppm in 24 hours, and the degradation rate was 79.4% [32].

### 3.2. Acclimated sludge

In order to measure the acclimatization effect of the sludge, experiments with acclimated sludge (C/A) on a batch reactor were developed. The following results were obtained:

In the above results the importance of acclimation of sludge in biological treatment can be observed. Conversion levels between acclimated sludge reactors were compared with ones that had not been acclimatized, and the differences noted. For the cases with acclimated sludge, biodegradation levels over 60% produced values of up to 98%, and in the case of sludge without acclimatization values ranging from 8 to 42% were obtained. An important factor is the acclimatization of the sludge, which plays an important role. High concentrations of lipids emulsified, about 400 mg/l are absorbed quickly and efficiently when they are brought into contact with activated sludge previously acclimated to low concentrations of lipids of 30 mg/l.[18]

These results are very similar to those obtained by other research on biodegradation of olive oil in a batch activated sludge system using both acclimated and non-acclimated sludge. For non-acclimated sludge, levels of biodegradability obtained between day 1 and day 4 were from 6% to 68%, while for acclimated sludge, results vary from day 2 to day 5 by 58% and 96% [34].

The feasibility of sewage sludge co-digestion using intermediate waste generated inside a wastewater treatment plant, i.e. trapped grease waste from the dissolved air flotation unit, has been assessed in a continuous stirred lab reactor operating at 35 °C with a hydraulic retention time of 20 days. The results indicate that a slow increase in the grease waste dose could be a strategy that favors biomass acclimation to fat-rich co-substrate, which increases long chain fatty acid degradation and reduces the latter's inhibitory effect. [31].

Moreover, there are laboratory studies for commercial supplements -multi bioaugmenters type species- that have verified the increase in the removal of fats and oils from 37% to 62% [6]. This bears some similarity to the effect of acclimatization of sludge: also being a biological type.

The use of bio augmenters was applied to bakery wastewater, which is rich in oils and fats. During this process, the pH, and the aeration system of an external

mix bioreactor was properly adjusted to optimize the efficiency of treatment tank and the biological filter. The main function of the external mix bioreactor is producing and injecting the improved biomass into the main system. A large reduction of fats and oils 1.5g / 0.03g / l was achieved. This improvement was been observed over a period of 20 months [19].

In other cases that are based on acclimatization, the bioremediation of a contaminated soil was compared with a gasoline-diesel fuel mixture on a laboratory scale, to evaluate biostimulation against natural attenuation and bioaugmentation. The reduction of Total Petroleum Hydrocarbons (TPH) concentration over the course of three months was 52.79% for natural attenuation, 60.45% for biostimulation and 64.92% for bioaugmentation. A bacterium with the capacity to degrade hydrocarbons identified as *Bacillus* sp. was isolated during inoculation in the bioaugmentation treatment [16].

A similar study for *Yarrowia lipolytica* W29 that was immobilized by calcium alginate was considered. In this case the main objective was to degrade the chemical oxygen demand (COD) and oil. Biodegradation by immobilized cells (cell density of  $6.65 \times 10^6$  CFU/ml), was able to remove up to 2000 mg/l of oil and up to 2000 mg / l of COD in 50 hours of treatment at 30°C (pH 7, 150 r/min). Similarly, using free cells, it was observed that the resulting biodegradation efficiency was 80% of the previously cited figures [21].

### 3.3. Effects of Joint Food

Experiences of biodegradation in batch systems for two types of influent, one with mixed feeding and another that only has oil were measured in order to assess the effects on the biodegradation of an additional substrate in the influent.

A non-acclimated biomass

When comparing the results shown in the above tables that correspond to levels of biodegradation obtained in a batch reactor, both strictly oily sucrose and mixed influent, the effect of acclimatization is confirmed. Higher levels of biodegradation are checked for acclimated sludge. This was undertaken at a temperature of 30°C and 200 (rev/min).

These results allow the effect of sucrose to be evaluated on the biodegradation of oil, which is manifested at a reduced level of oil biodegradability. This is explained by the fact that microorganisms have an alternative carbon source and competitive phenomena occur. It can be said that the presence of sucrose causes an inhibitory effect on the biodegradation of oil.

Table 4. Biodegradation of oil in batch systems without acclimatization and sucrose.

| Oil (g) | Oil rem. (g) | Saccharin (g) | Conc biom (mg/l) | Vol. Biom (ml) | Efficie Biode (%) | Period (day) |
|---------|--------------|---------------|------------------|----------------|-------------------|--------------|
| 1       | 0,37         | 0,5           | 5000             | 150            | 63                | 1            |
| 1       | 0,38         | 0,5           | 5000             | 150            | 62,0              | 2            |
| 1       | 0,23         | 0,5           | 5000             | 150            | 67,0              | 3            |
| 1       | 0,26         | 0             | 5000             | 150            | 74,0              | 1            |
| 1       | 0,12         | 0             | 5000             | 150            | 78,0              | 2            |
| 1       | 0,19         | 0             | 5000             | 150            | 81,0              | 3            |

Source: Authors' own.

Table 5.

Biodegradation of oil in batch systems with acclimatization and sucrose.

| Oil (g) | Oil rem. (g) | Saccharin (g) | Conc biom (mg/l) | Vol. Biom (ml) | Efficie Biode (%) | Period (day) |
|---------|--------------|---------------|------------------|----------------|-------------------|--------------|
| 1       | 0,41         | 0,5           | 5000             | 150            | 59,0              | 1            |
| 1       | 0,29         | 0,5           | 5000             | 150            | 71,0              | 2            |
| 1       | 0,26         | 0,5           | 5000             | 150            | 74,0              | 3            |
| 1       | 0,29         | 0             | 5000             | 150            | 71,0              | 1            |
| 1       | 0,16         | 0             | 5000             | 150            | 84,0              | 2            |
| 1       | 0,04         | 0             | 5000             | 150            | 96,0              | 3            |

Source: Authors' own.

In this case, sunflower oil biodegradation was studied in a batch-type system for both types of influent, over a period of three days, with the same concentration of biomass, at a temperature of 30°C and 200 (rev/min).

As can be seen from the results, for the cases where the influent only has oil and the biodegradation growth level achieved ranges from 71% to 96%, for acclimatized biomass with levels between 73,6 to 81%, and for non-acclimatized biomass, a higher level of biodegradation is observed. For the influent case in which biomass was acclimatized at between 62.2 to 66,7%, and for non-acclimatized biomass that has sucrose as well as the oils, biodegradation ranges from between a 59% and 74%, and the reaction times are from one to three days.

In similar experiences, considering the same amount of biomass (500 mg/l), where only vegetable oil is present in the effluent, a range of biodegradation is observed between 74% and 81% for the non-acclimated biomass. These results are clearly lower than the range observed for acclimated biomass (71 to 96%)

The intake besides oil also contains saccharin. The biodegradation reaches ranges of between 62% and 67% for the non-acclimated biomass and 59% and 71% for the acclimated biomass.

In both experiments the processing time ranges from between one to three days. Similarly, in both cases, with and without acclimation, it is observed that the procedure improves the oil biodegradation level, and the alternative substratum (saccharin) also competes with the oil reducing in both cases its degradation levels.

This confirms the previously obtained results regarding acclimatization. It also appears that the concentration of TSS is not relevant between the 4000-6000 mg/l range.

The experiments conducted characterized the transformation of lipids in the activated sludge under aerobic conditions. The results show that the total lipid content in the effluent could not be reduced to values below 300 mg/l from an initial concentration of 2000 mg/l [9]. This is a value that is consistent with those obtained in this investigation, which reached 98% within three days of residence time, larger than that of activated sludge.

This study investigates the COD removal of two-phase anaerobic digestion to treat a mixture (1/5 v/v) of used vegetable oil waste and pig manure. It uses two semi-continuous digesters that were operated at a mesophilic temperature. One of the experiments was conducted at a hydraulic retention time (HRT) of 4 days in the first stage (acidifier) and at a HRT of 20 days in the second stage

(methanizer). The CODs removal efficiency were 44% and 79,5% respectively [17].

#### 4. Conclusions

Under all conditions it was possible to remove oil biodegradation pathways with levels ranging from 10% to about 90%.

It was found that acclimation of sludge substantially improves the efficiency of biodegradation, increasing it from an average value of 30% with no biomass acclimated to an average of 80% over a period ranging from 1 to 3 and 1 to 4 days.

The presence of other more biodegradable substrates, such as saccharine, reduces the efficiency of biodegradation of sunflower oil, from an average value of 80% to 65%.

#### References

- [1] APHA - AWWA - WPCF, Métodos normalizados para el análisis de agua potable y aguas residuales, Editorial Díaz de Santos, Madrid, 17 Edición, 1992.
- [2] Barrios, Y., Bioremediación: Una herramienta para el saneamiento de ecosistemas marinos contaminados con petróleo, Biotecnología Aplicada, 28, pp. 60-68, 2011.
- [3] Belitz, H.D. y Grosch, W., Química de los Alimentos, 2<sup>da</sup> Ed., Editorial Acirbia S.A., Zaragoza, España, 1997.
- [4] Bergmann, H., Electrochemical treatment of cooling lubricants, Chemical Engineering and Processing, 42 (2), pp. 105-119, 2003. DOI: 10.1016/S0255-2701(02)00020-X
- [5] Betton, C.I., Lubricants, en: Orszulik S.T, Ed., Environmental technology in the oil industry, Blackie Academic Professional, London, 1997, pp. 367-381.
- [6] Bitton, G., Wastewater Microbiology, John Wiley & Sons, New York, 1994.
- [7] Brooksbank, A.M., Latchford, J.W. and Mudge, S.M., Degradation and modification of fats, oils and grease by commercial microbial supplements, World Journal of Microbiology and Biotechnology, 23, pp. 977-985, 2007. DOI: 10.1007/s11274-006-9323-1.
- [8] Cain, R., Designing biodegradable molecules for the oleochemicals industries, Journal Chem. Tech. Biotechnology, 55, pp. 397-414, 1992. DOI: 10.1002/jctb.280550424
- [9] Chipasa, K.B. and Medrzycka, K., Behavior of lipids in biological wastewater treatment processes, Journal of industrial microbiology and biotechnology, 33 (8), pp. 635-45, 2006. DOI: 10.1007/s00284-009-9525-5
- [10] Chipasa, K.B. y Medrzycka, K., Characterization of the fate of lipids in activated sludge, Journal of environmental sciences (China), 20(5), pp. 536-42, 2008.
- [11] Chudoba, J., Ottova, V. and Madera, V., Control of activated sludge filamentous bulking-I. Effect of the hydraulic regime on degree of mixing in an aeration tank, Water Resources, 7, pp. 1163-1182, 1973.
- [12] CONAMA, Guía para el control y prevención de la contaminación industrial, Fabricación de grasas y aceites vegetales y subproductos, 1998.
- [13] De Turrís, A., Yabroudi, S.C., Valbuena, B., Gutierrez, C., Cardenas, C., Herrera, L. y Rojas, C., Tratamiento de aguas de producción por flotación con aire disuelto, Interciencia, 36 (3), pp. 211-218, 2011.
- [14] Dueholm, T.E., Andreasen, K.H. and Nielsen, P.H., Transformation of lipids in activated sludge, Water Science and Technology, 43 (1), pp. 165-172, 2001.
- [15] Germirli, F., Cekyay, E., Eremektar, G. and Orhon, D., Pollutions loads and inert COD in the laying chicken industry, Water Science and Technology, 40 (1), pp. 207-213, 1999. DOI: 10.1016/S0273-1223(99)00386-8
- [16] Gomez, W., Gaviria, J. y Cardona, S., Evaluación de la bioestimulación frente a la atenuación natural y la bioaumentación en

- un suelo contaminado con una mezcla de gasolina -diésel. DYNA 76 (160), pp. 83-93, 2009.
- [17] Hidalgo, D., Gomez, M., Aguado, A., Martin, J and Sastre, E., Valorization of residues from refining of used vegetable oils. DYNA 81 (184), pp. 20-27, 2014. DOI: 10.1016/S0273-1223(99)00386-8
  - [18] Hruđey, S.E., Factors limiting emulsified lipid treatment capacity of activated sludge, Journal Water Pollution Control Federation, 54 (8), pp. 1207-1214, 1982.
  - [19] Keenan, D. and Sabelnikov, A., Biological augmentation eliminates grease and oil in bakery wastewater, Water Environment Research, 72 (2), pp. 141-146, 2000. DOI: 10.2175/106143000X137202
  - [20] Kurashige, J., Matsuzaki, N. and Makabe, K., Modifications of fats and oils by lipases, J. Dispersion Science and Technology, 10, pp. 531-559, 1989. DOI: 10.1080/01932698908943187
  - [21] Lan, W., Gang, G.E. and Jinbao, W., Biodegradation of oil wastewater by free and immobilized *Yarrowia lipolytica* W29, Journal of Environmental Sciences, 21, pp. 237-242, 2008.
  - [22] Martinez, O., Wilhelm, A.M. and Riba, J.P., Kinetic study of an enzymatic liquid-liquid reaction: The hydrolysis of tributyrin by *Candida cylindracea* lipase, J. Chem. Tech. Biotechnology, 53, pp. 373-378, 1992. DOI: 10.1002/jctb.280530409
  - [23] METCALF - EDDY, Wastewater engineering: Treatment and reuse, Ed. McGraw Hill, 4ª Ed., 2002.
  - [24] Morgenroth, E., Kommedal, R. and Harremoës, P., Process and modeling of hydrolysis of particulate organic matter in aerobic wastewater treatment - a review, Water Science and Technology, 45 (6), pp. 25-40, 2002.
  - [25] Ratledge, C., Microbial oxidations of fatty alcohols and fatty acids, J. Chem. Tech. Biotechnology, 55, pp. 399-400, 1992. DOI: 10.1002/jctb.280550418
  - [26] Rittmann, B. y McCarty, P., Biotecnología del medio ambiente, Ed. McGraw Hill, Madrid, España, 2001.
  - [27] Ronzano, E. y Dapena, J., Tratamiento biológico de las aguas residuales, 2ª Ed., Ediciones Díaz de Santos, Madrid, España, 2002.
  - [28] Sainz, J., Ingeniería Química, Separación de aceites de efluentes industriales, 409, pp. 93-99, 2004.
  - [29] Schönborn, W., Biotechnology: Microbial Degradation, VCH. Verlagsgesellschaft, Weinheim, Germany, 8, 1986.
  - [30] Scott, J.P. and Ollis, D.F., Integration of chemicals and biological oxidation processes for water treatment: Review and recommendations, Environmental Progress, 14 (2), pp. 88-103, 1995. DOI: 10.1002/ep.670140212
  - [31] Silvestre, G., Rodríguez-Abaldea, B., Fernandez, X., Flotats, X. and Bonmatia, A., Biomass adaptation over anaerobic co-digestion of sewage sludge and trapped grease waste, Bioresource Technology, 102 (13), pp 6830-6836, 2011. DOI:10.1016/j.biortech.2011.04.019.
  - [32] Sugimori, D., Edible oil degradation by using yeast coculture of *Rhodotorula Pacifica* ST 3411 and *Cryptococcus Laurentii* ST 3412, Applied Microbiology and biotechnology, 82 (2), pp. 351-357, 2009. DOI: 10.1007/s00253-008-1834-2
  - [33] Van Loosdrecht, M. and Henze, M., Maintenance, endogeneous respiration, lysis, decay and predation, Water Science and Technology, 39 (1), pp. 107-117, 1999. DOI: 10.1016/S0273-1223(98)00780-X
  - [34] Wakelin, N.G. and Forster, C.F., An investigation into microbial removal of fats, oils and greases, Bioresource Technology, 59, pp. 37-43, 1997. DOI: 10.1016/S0960-8524(96)00134-4

**P. Cisterna-Osorio**, received his degree in BSc. in Chemical Eng. in 1988, and his degree BSc. in Industrial Engineering in 1991, both from the University of Concepcion, Concepcion, Chile. He is currently an Environmental Engineering PhD candidate in the University of Oviedo, Oviedo, Spain. From 1990 to 2000 he worked in the industry on tasks relating to the treatment of wastewater. From 2000 he worked as professor at the University of Bio Bio, Concepcion, Chile. He is now full-time professor in the Department of Civil and Environmental Engineering. His research interests include: water treatment, residues management and air contamination.

ORCID: [orcid.org/0000-0003-0460-5640](http://orcid.org/0000-0003-0460-5640)

**Gutierrez-Lavin**, is an associate professor at Oviedo University. He received his degree BSc. in Chemical Engineering in 1974 and his PhD in Chemical Engineering in 1985, from the Oviedo University, Oviedo, Spain. His areas of interest are particle technologies, water treatment and energy applications from biomass. His most important publications in recent years are: Evolution of phytoplankton cultures after ultraviolet light treatment. Mar. Pollut. Bull. 64, 556-562 (2012); Characterization of Spanish Biomass wastes for energy use, Bioresource 103, 1 249-258 (2012) Technology, 103; New Developments in Sedimentation and Sedimentator Design; Recent Patents on Chemical Engineering, 2010, 3, 129-141 (2010); Vortex finder optimum length in hydrocyclone separation. Chem. Eng. Process. 47(2), 192-199 (2008).

ORCID: [orcid.org/0000-0003-0011-2531](http://orcid.org/0000-0003-0011-2531)

**H Sastre-Andres**, Dr. en Ciencias Químicas por la Universidad de Oviedo con Premio Extraordinario de Licenciatura y de Doctorado y Catedrático de Tecnología del Medio Ambiente de la Universidad de Oviedo, donde ha impartido docencia en Ingeniería Química e Ingeniería Ambiental desde 1976. Estancias de estudios e investigación en la Universidad de Trondheim (Noruega, 1979), Universidad Tecnológica de Pardubice (Checoslovaquia, 1980) Universidad de Sherbrooke (Canadá, 1985) y la Universidad de Pittsburgh (Estados Unidos, 1986). Sus áreas de interés son el tratamiento de gases residuales, gestión de residuos sólidos y los procesos catalíticos.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN  
FACULTAD DE MINAS

## Área Curricular de Ingeniería Química e Ingeniería de Petróleos

### Oferta de Posgrados

Maestría en Ingeniería - Ingeniería Química  
Maestría en Ingeniería - Ingeniería de Petróleos  
Doctorado en Ingeniería - Sistemas Energéticos

Mayor información:

E-mail: [qcaypet\\_med@unal.edu.co](mailto:qcaypet_med@unal.edu.co)  
Teléfono: (57-4) 425 5317

# Analysis of the partial discharge pulse propagation in the stator winding of a synchronous machine

José Luis Oslinger-Gutiérrez <sup>a</sup>, Fabio Andrés Muñoz-Muñoz <sup>b</sup> & Jaime Antonio Vanegas-Iriarte <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, Colombia. [jose.oslinger@correounivalle.edu.co](mailto:jose.oslinger@correounivalle.edu.co)

<sup>b</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, Colombia. [fabio.a.munoz@correounivalle.edu.co](mailto:fabio.a.munoz@correounivalle.edu.co)

<sup>c</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, Colombia. [jaime.vanegas@correounivalle.edu.co](mailto:jaime.vanegas@correounivalle.edu.co)

Received: October 2<sup>nd</sup>, 2014. Received in revised form: January 20<sup>th</sup>, 2015. Accepted: February 20<sup>th</sup>, 2015.

## Abstract

In this paper, a study of the propagation of partial discharge pulses in the stator winding of a synchronous machine is presented. This study was performed by injecting artificial partial discharge pulses in the stator winding of a 2.4 kV/210 kVA salient-pole synchronous machine. It was found that the propagation of the partial-discharge PD signals is presented in two modes: the slow mode, in which the coil acts as a transmission line; and the fast mode, in which the pulse propagates through the overhangs. The fast mode is due to capacitive and inductive couplings in the overhangs. In the slow mode, a PD signal manifests itself at the generator terminals after a transit time that depends on the distance traveled by the pulse. A strong positive linear correlation was observed between the arrival time in the slow mode and the length traveled by the pulse in this mode. The DC ohmic resistance between the injection point and the measurement point was used to represent the distance traveled by the pulse in the slow mode. The capacitive and inductive couplings also cause a crosstalk between the phases. As a consequence, a PD signal can be measured at different phases to the origin phase. In the slow mode, the signal will suffer attenuation in amplitude due to the dispersion and the absorption of energy while it propagates in the slow mode.

Keywords: partial discharge, partial discharge pulse propagation, stator winding, rotating electrical machine.

# Análisis de la propagación de pulsos de descarga parcial en el devanado del estator de una máquina sincrónica

## Resumen

En este artículo se presenta un estudio de la propagación de pulsos de descarga parcial en el devanado del estator de una máquina eléctrica sincrónica. El estudio se realizó inyectando pulsos artificiales de descarga parcial en el devanado del estator de una máquina sincrónica de polos salientes de 2.4 kV/210 kVA. Se encontró que la propagación de la señal de descarga parcial se presenta en dos modos: el modo lento, en el cual las bobinas actúan como una línea de transmisión, y el modo rápido, en el que el pulso se propaga a través de las cabezas de bobina. El modo rápido es debido a los acoplamientos capacitivos e inductivos de las cabezas de bobina. En el modo lento, una señal de descarga parcial se manifiesta en los terminales del generador después de un tiempo de viaje que depende de la distancia recorrida por el pulso. Se encontró una fuerte correlación positiva entre el tiempo de llegada del modo lento y la longitud recorrida por el pulso en el modo lento. La resistencia óhmica de DC entre el punto de inyección y el punto de medición fue utilizada para representar la distancia recorrida por el pulso en el modo lento. Los acoplamientos capacitivos e inductivos de las cabezas de bobina ocasionan *crosstalk* entre fases. Como consecuencia, una señal de PD puede ser medida en fases diferentes a la de origen. En el modo lento, las señales sufren atenuación en su amplitud, debido a la dispersión de la señal y a la absorción de energía, a medida que se propagan en el modo lento.

**Palabras clave:** descargas parciales; propagación de pulsos de descarga parcial, devanado del estator, máquina eléctrica rotativa.

## 1. Introduction

In [1], it was found that 56% of faults that arise in hydro generators are due to the failure of the stator winding insulation system.

Partial discharges arise within the insulation winding and generate electromagnetic waves that propagate inside and outside of the winding. Many systems of partial discharge measurement are based on the capture and processing of these signals [2].

Perhaps the most extreme example of propagation path complexity is found in rotating machines [3]. The geometry, wide range of materials and interfaces, and complexity of the physical and electrical paths of rotating machines all conspire to modify the discharge pulse in a way that makes characterization extremely difficult. Therefore, the electromagnetic waves will propagate in different modes [4], will suffer attenuation and reflections and will find complex and variable impedances in regions of slots and overhangs.

Previous studies have found the presence of two modes of signal propagation [4,5], the slow mode, or traveling wave, and the fast mode, or coupling wave. In the slow mode, a discharge pulse will propagate through the stator winding as in a transmission line [6], where the energy is transmitted by a conduction current and propagated in the space around the conductor. In the slow mode, the winding acts as a guide, along which electromagnetic energy moves [7]. In the fast mode, the wave travels through the capacitive and inductive coupling of the overhangs [6,8], causing a leakage field in which energy is coupled to the surrounding conductors through a displacement current [5]. The propagation time in the fast mode is very short compared to the slow mode because the distance is much smaller. The propagation speed is the speed of light in a vacuum,  $c$ , because the propagation medium is air [8]. These propagation modes are strongly associated with the spectral components of the PD signal, with the slow mode corresponding to the low frequencies of the signal and the fast mode corresponding to the high frequencies of the signal [6]. In the slow mode, while the wave propagates, the signal attenuates and changes shape due to the dispersion [4].

This paper presents the test results of the electromagnetic characterization of the propagation of an artificial partial discharge pulse in the stator winding of a 2.4 kV/210 kVA salient-pole electrical machine.

## 2. Experimental Setup

For this study, we used the stator winding of a 210 kVA/2.4 kV three-phase salient-pole synchronous generator (without rotor), as shown in Fig. 1. The stator is lap type with four slots per phase and per pole ( $q=4$ ), a double layer and a coil pitch of  $y = 8$ . The machine has 96 coils, so each phase has 32 coils. The number of turns per coil is 7, and the conductor is composed of two strands.

A RIGOL® DS1052E digital oscilloscope with a 50 MHz bandwidth was used to measure the signals. The injection of a simulated PD signal was performed using a DG1022 RIGOL® signal generator with a 50  $\Omega$  source impedance.

For the signal injection, a hole was made in the middle of the top layer of each of the 32 coils of phase R. Copper conductors were installed in these holes, as shown in Fig. 2. and Fig. 3. The signals were injected through these conductors directly to the stator winding. A 50  $\Omega$  resistor was installed in parallel at the injection point to avoid pulse reflection.

The general scheme of the test is presented in Fig. 4.



Figure 1. Stator of the electrical machine of 210 kVA.  
Source: The authors.

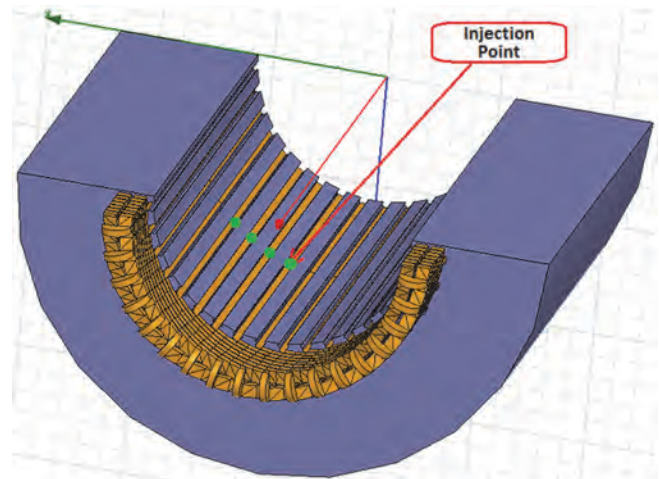


Figure 2. Spatial position of the injection point of the signal.  
Source: The authors.

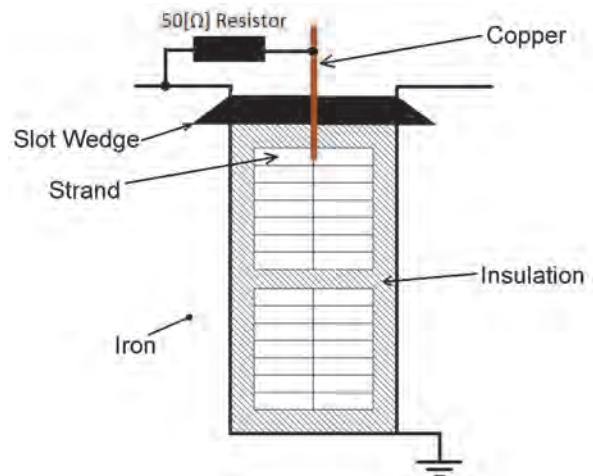


Figure 3. Injection point inside the slot.  
Source: The authors.

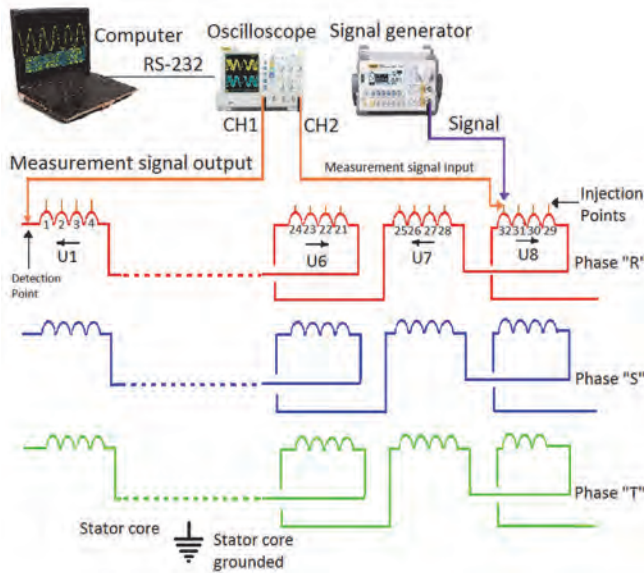


Figure 4. General scheme of the test.  
Source: The authors.

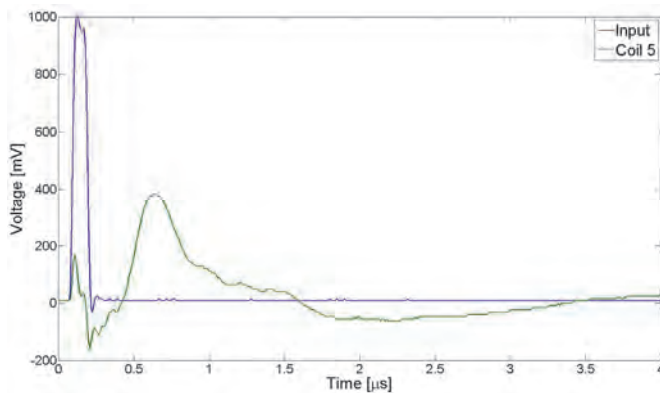


Figure 5. Response at the measurement terminal for the signal injection into coil 5.  
Source: The authors.

### 3. Experimental results

#### 3.1. Propagation modes

A simulated signal of partial discharge, such as a Gaussian pulse of amplitude 1 V, rise time of 27.5 ns and pulse width of 100 ns, was injected at coil 5. The response at the high voltage terminal of phase R is shown in Fig. 5.

Fig. 5 shows that the signal propagation arrives at the measurement terminal in two modes. The first is detected almost immediately after the signal was injected and thus has been commonly called *fast* or *wave coupling*. The second mode arrives at the measurement terminal with a significant time delay; this propagation mode is known as *traveling wave* or *slow mode*.

#### 3.2. Signal processing

After injecting the signals in all of the coils, the responses were measured at the measurement terminal, and signal processing was applied to these signals. Such processing includes noise removal and the separation of the two propagation modes, slow and fast. To separate the propagation modes, we used the discrete wavelet transform because this transform is formed by passing the PD signal through a series of quadrature filters consisting of a high-pass and a low-pass filter [9], as shown in Fig. 6. In general, wavelets are functions defined over a finite interval that possess an average value of zero. The CWT is a tool for dividing functions into components of different frequency, which allows us to study each component separately [10]. Wavelet decomposition produces an 'approximation', A, as the output of the low-pass filter and a 'detail', D, as the output of the high-pass filter [9], as shown in Fig. 7. [11]. We used various discrete wavelet transforms, obtaining the best results with the Daubechies 20 (DB20) in five levels. The coefficient  $a_5$  of this transform represents the slow mode. The sum of coefficients  $d_5$ ,  $d_4$ , and  $d_3$  represents the fast mode. Coefficients  $d_1$  and  $d_2$  are considered noise. Fig. 8 presents the signal processing to the signal obtained at the high voltage terminal after injecting the pulse at coil 5.

#### 3.3. Variation of the injection point.

Fig. 9 shows the response at the measurement terminal when the signal is injected successively in each coil of phase R.

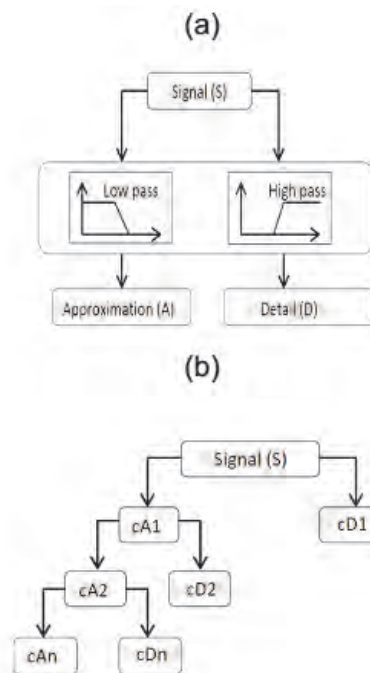


Figure 6. The fundamental of the discrete wavelet decomposition. a) High- and low-pass filters b) iterative process of multilevel decomposition.  
Source: Rahman, 2011.

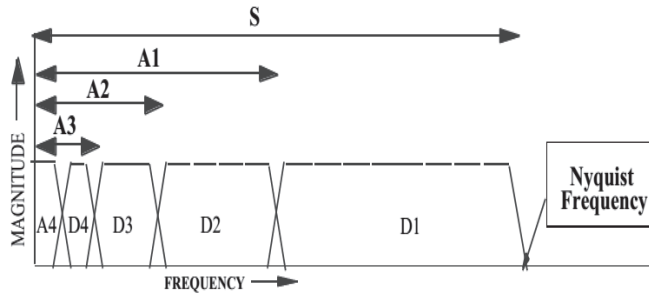


Figure 7. Multilevel decomposition in the frequency.  
Source: Fugal, 2009

Both propagation modes are present in every signal. Fig. 9 also shows that the propagation time of the slow mode increased as the injection point moved away from the measurement terminal.

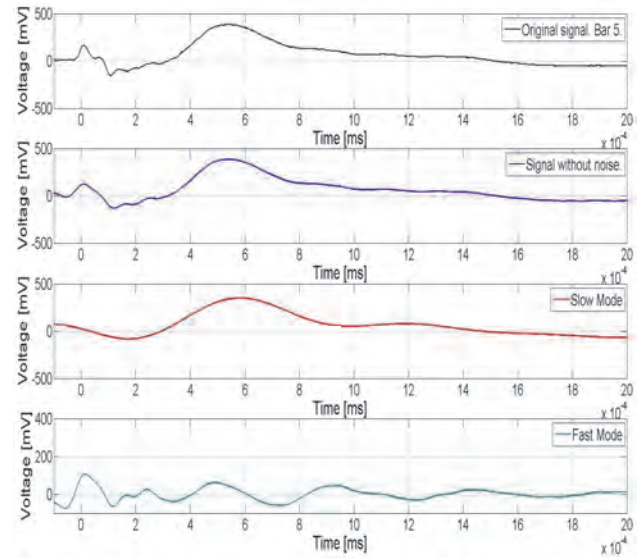


Figure 8. Processing the signal generated from coil 5.  
Source: The authors.

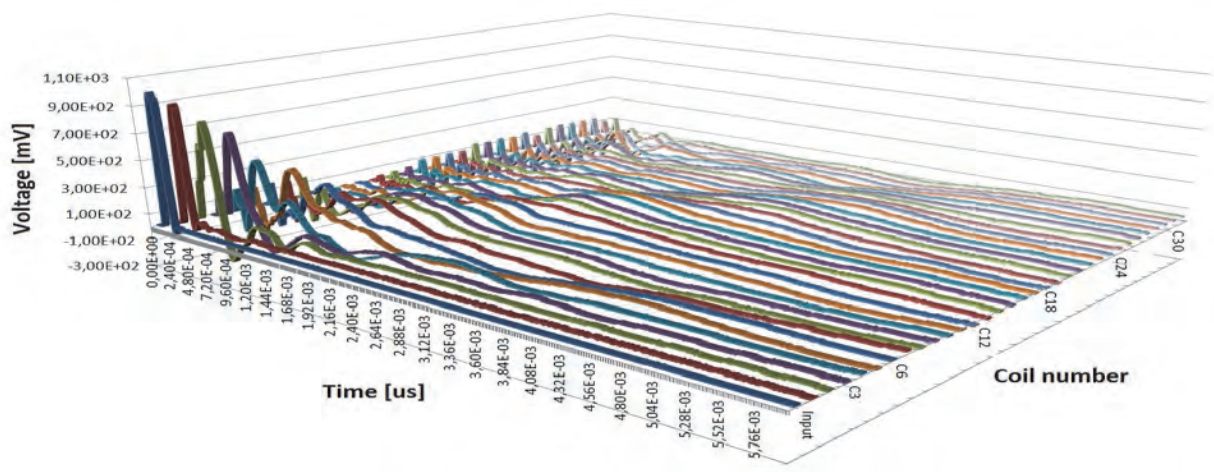


Figure 9. Variation of the injection point of the signal.  
Source: The authors.

### 3.4. Harmonic spectrum

Fig. 10 shows the harmonic spectrum of the response at the high-voltage terminal of phase R due to the injection of an artificial pulse of PD at each of the 32 coils of phase R.

Figs. 11 and 12 show the harmonic spectrum of the slow and fast propagation modes of the signals measured due to injection of an artificial pulse at coils 5 and 15.

## 4. Analysis

### 4.1. Arrival time

After performing signal processing using the wavelet transform, we proceed to determine, via the energy method [12], the arrival time of the propagation modes versus the coil

number. This plot is shown in Fig. 13.

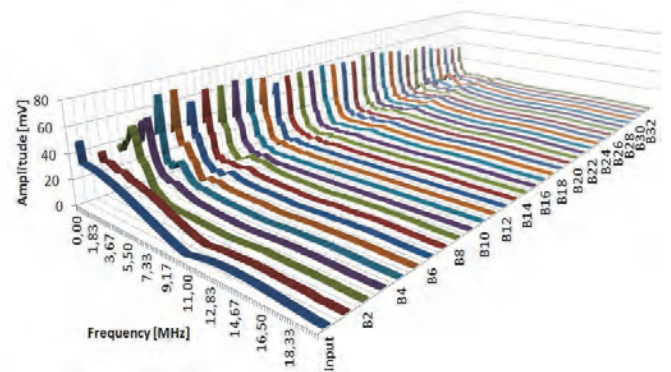


Figure 10. Harmonic spectrum.  
Source: The authors.

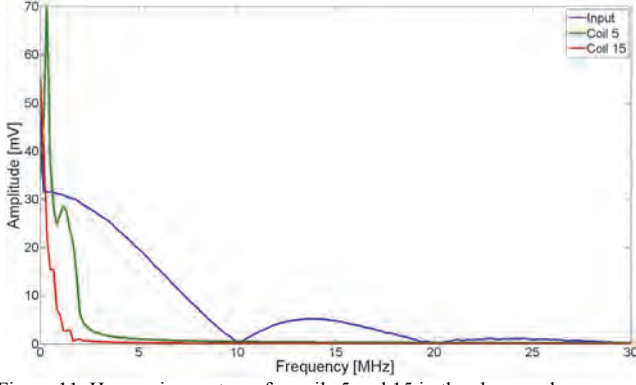


Figure 11. Harmonic spectrum for coils 5 and 15 in the slow mode.  
Source: The authors.

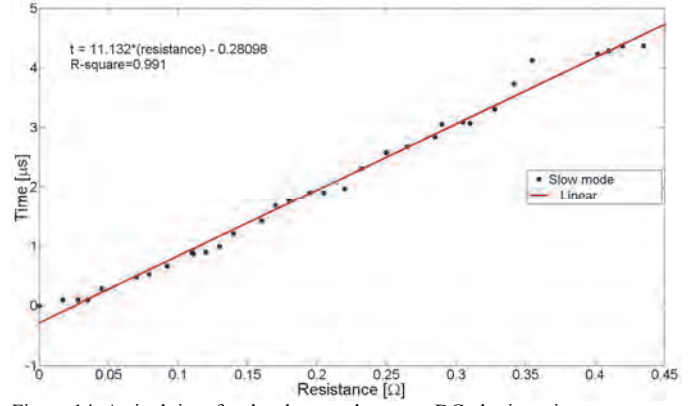


Figure 14. Arrival time for the slow mode versus DC ohmic resistance.  
Source: The authors.

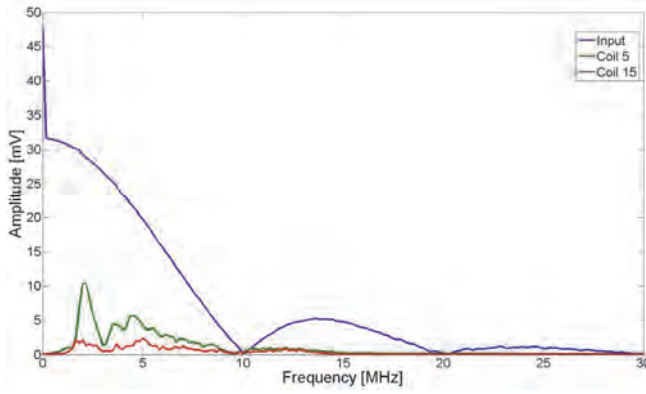


Figure 12. Harmonic spectrum for coils 5 and 15 in the fast mode.  
Source: The authors.

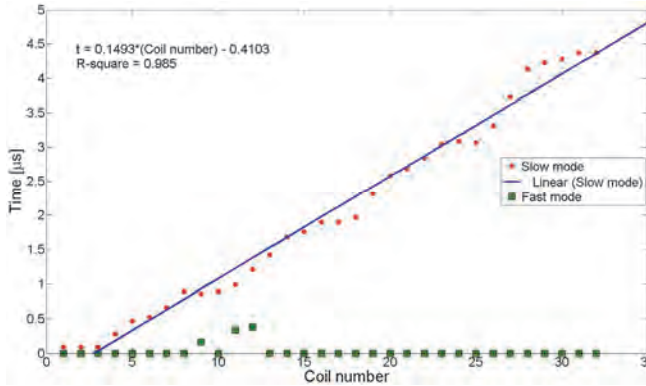


Figure 13. Arrival time versus coil number.  
Source: The authors.

In Fig. 13, one can observe that the arrival time of the fast mode is independent of the injection point of the signal. Unlike the arrival time of the fast mode, that of the slow mode presents a strong positive linear correlation with the distance traveled by the pulse at the winding.

Because the winding is lap type and has four slots per pole and per phase, the coil number is not the most appropriate parameter for relating to the length traveled by the pulse in the slow mode. Therefore, presenting the arrival time of the slow mode versus the real length traveled by the pulse is most

appropriate. Measuring the real length traveled by the pulse in the stator winding is difficult. Therefore, we used the DC ohmic resistance measured between the injection point and the high voltage terminal as an indirect measure of the winding phase length. Fig. 14 shows the arrival time at the slow mode versus the DC ohmic resistance.

#### 4.2. Propagation velocity of the slow mode

The propagation velocity of the signal is constant over the whole winding. This propagation velocity is called the group velocity [13] and is dependent on the harmonic content of the injected signal, i.e., if a pulse is injected with different characteristics, a pulse with different harmonic content and a different propagation velocity is obtained [8,14,15].

The propagation velocity of the slow mode is obtained by performing linear regression of the data presented in Fig. 14. The linear regression is presented in eq. (1).

$$t = (11.132 \cdot R - 0.281) (\mu s) \quad (1)$$

where  $t$  is the arrival time of the slow mode and  $R$  is the DC ohmic resistance in  $\Omega$ .

Conductor DC ohmic resistance is defined by

$$R = \frac{\rho \cdot L}{S} \quad (2)$$

where  $L$  is the length of conductor,  $S$  is the cross-section and  $\rho$  is the resistivity.

Substituting eq. (2) in eq. (1), we have

$$t = \left( 11.132 \cdot \frac{\rho \cdot L}{S} - 0.281 \right) \cdot 10^{-6} (s) \quad (3)$$

Solving eq. (3) gives

$$\frac{L}{t - 0.281} = \frac{S}{11.132 \cdot \rho \cdot 10^{-6}} \quad (4)$$

In our specific case, the cross section of the conductor is  $14.44 \mu m^2$  and it is assumed that resistivity is equal to the resistivity of copper, i.e.,  $1.7 \cdot 10^{-8} \Omega m$ . Substituting these values into eq. (4), we have

$$\frac{L}{t-0.281} = 76,30 \cdot 10^6 \quad (5)$$

Assuming that

$$v_{prop} \approx \frac{L}{t-0.281} \quad (6)$$

We have that the propagation velocity of the slow mode of the signal is approximately 76.30 m/μs or 25.43% of the speed of light in vacuum. In [4], a propagation velocity of 9.1 m/μs was found. In [6], a propagation velocity of 70 m/μs was found. These velocities are slower than propagation velocity found in this case. The resistance is not involved in the velocity of the pulse, and, in this paper, it is only used as an indicator of the winding length.

#### 4.3. Attenuation and dispersion of the electromagnetic wave

In the slow mode, the signal suffers an attenuation of the voltage amplitude due to power loss and signal dispersion [11,12]. Energy loss is caused by the absorption of energy by the ferromagnetic core, the conductor and the insulation of the winding. The propagation medium for the slow mode in a stator winding is dispersive due to the geometry and materials involved in the propagation path. A dispersive medium

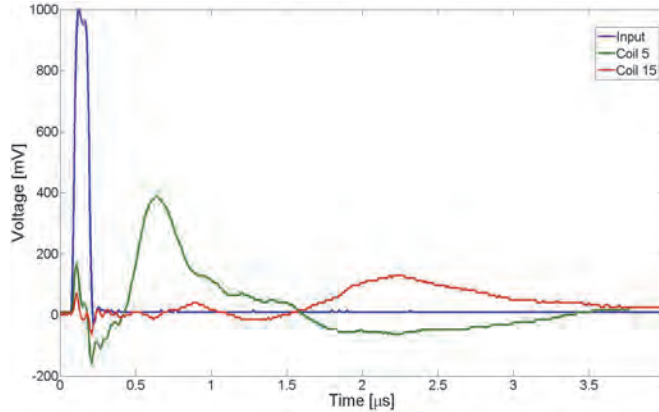


Figure 15. The pulse widening due to propagation in a dispersive medium.  
Source: The authors.

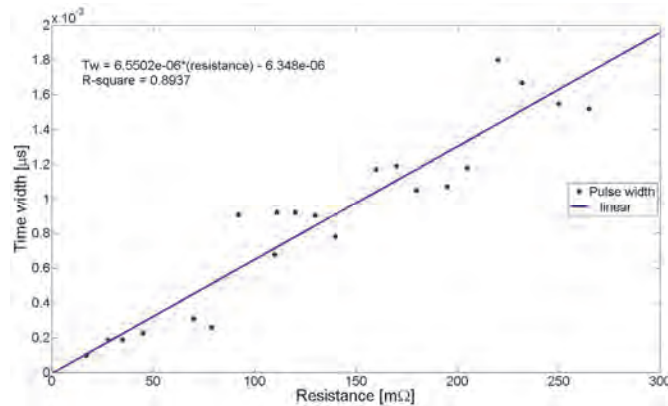


Figure 16. Variation of pulse width versus DC ohmic resistance.  
Source: The authors.

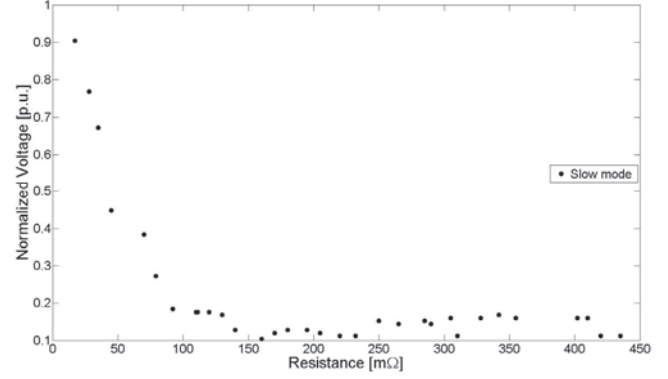


Figure 17. Normalized values of peak signal voltages at the slow mode.  
Source: The authors.

causes the speeds of the harmonic components of the pulse to be different, which means that the shape of the signal is not preserved as it moves through the winding [13]. The effect of dispersion on the pulse is widening in time [16,17], as shown in Fig. 15. and Fig. 16. If the energy loss of the electromagnetic wave is negligible, the area under the curve of the pulse must remain approximately constant, and, hence, the widening in time causes a decrease in the voltage amplitude. Fig. 17 shows the normalized peak voltage values for the slow propagation mode versus the DC ohmic resistance.

#### 4.4. Variation of the rise time.

Fig. 18 shows the effect of the slow mode propagation on the rise time of the signal. The rise time is dependent on the injection point. [18-20] stated the same fact for the electrical machines and cables.

#### 4.5. Crosstalk

As mentioned above, in the fast mode, the electromagnetic wave propagates through the capacitive and inductive coupling of the overhangs, which means that the fast mode of the injected signal at phase R will engage with phases S and T. Therefore, a signal injected at phase R can be detected in phases S and T. Fig. 19 shows the crosstalk due to the injection of a signal at coil 12 of phase R and the measured response at the measurement terminals of phases

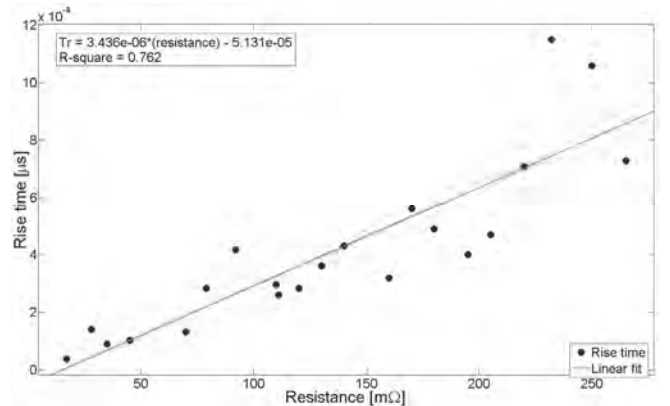


Figure 18. Rise time versus DC ohmic resistance.  
Source: The authors.

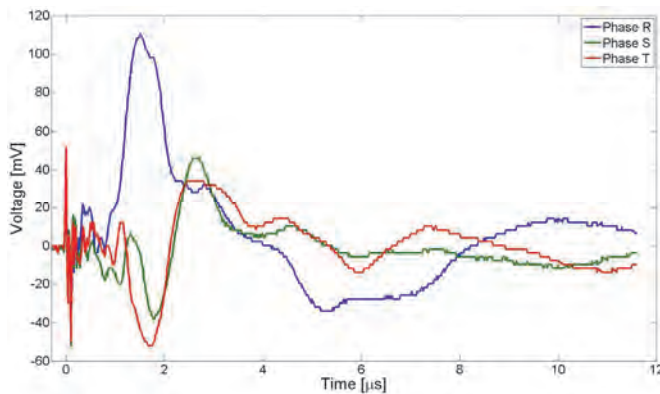


Figure 19. Crosstalk between phases when the pulse was injected at coil 12. Source: The authors.

R, S and T. All the injected signals produced crosstalk, and the signals induced are similar to the injected signal and may even have a greater voltage magnitude [4].

## 5. Conclusions.

In the slow mode, the PD pulse arrives at the generator terminals with a time delay. The time delay has a strong positive linear correlation with the length traveled by the pulse. In this case, the DC ohmic resistance between the injection point and the measurement point was used as an indicator of the winding phase length.

We found that the signal velocity at the slow mode is 76.30 m/μs or 25.43% of the speed of light in a vacuum.

The slow mode amplitude decreases as the injection point of the signal move away from the measuring point.

At the slow mode, the signal widens in time while it propagates through the winding.

The rise time of the slow mode was found to increase while the electromagnetic wave propagates through the winding.

Due to capacitive and inductive coupling in the region of the overhangs, at high frequencies, we found a second mode of propagation, which is commonly known as the fast mode or coupling wave because it manifests in the terminals without appreciable delay.

Due to crosstalk or coupling between the phases, a measured PD signal in a phase does not necessarily indicate that the signal originated from a discharge at this phase.

## Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge the support of Colciencias, Colombia.

## References

- [1] Sumereder, C., Statistical lifetime of hydro generators and failure analysis. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 15 (3), pp. 678-685, 2008. DOI: 10.1109/TDEI.2008.4543104
- [2] IEEE, IEEE Trial-use guide to the measurement of partial discharges in rotating machinery. Electrical Insulation (ISEI), 2000. DOI: 10.1109/IEEESTD.2000.91905

- [3] Zhu, H. and Kemp, I.J., Pulse propagation in rotating machines and its relationship to partial discharge measurements. In Conference Record of the 1992 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp. 411-414, 1992. DOI: 10.1109/ELINSL.1992.246970
- [4] Pemen, A.J.M., van der Laan, P.C.T. and de Leeuw, W., Propagation of partial discharge signals in stator windings of turbine generators. IEEE Transactions on Energy Conversion, 21 (1), pp. 155-161, 2006. DOI: 10.1109/TEC.2005.847949
- [5] Zhou, C. and Kemp, I.J., On the use of the travelling wave for partial discharge location in rotating machine stator windings. In 1998 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (Cat. No.98CH36257), pp. 379-382, 1998. DOI: 10.1109/CEIDP.1998.732915
- [6] Wilson, A., Jackson, R. and Wang, N., Discharge detection techniques for stator windings. Electric Power Applications, 132 (5), pp. 234-244, 1985. DOI: 10.1049/ip-b.1985.0034
- [7] Matveev, Electricidad y Magnetismo. URSS: Editorial MIR, 1988.
- [8] Zhou, C., Kemp, I.J. and Allaa, M., The PD pulse behaviour in rotating machine stator windings. In Proceedings of 1995 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 372-375, 1995. DOI: 10.1109/CEIDP.1995.483740
- [9] Rahman, M.S.A., Hao, L. and Lewin, P.L., Partial discharge location within a transformer winding using principal component analysis. [Online]. In 17th International Symposium on High Voltage Engineering, 2011. Available on: <http://eprints.soton.ac.uk/272708/>
- [10] Mijarez, R., Baltazar, A., Rodríguez- Rodríguez, J. and Ramírez-Niño, J., Damage detection in ACSR cables based on ultrasonic guided waves. DYNA, 81 (186), pp. 226-233, 2014. DOI: 10.15446/dyna.v81n186.40252
- [11] Fugal, D.L., Conceptual wavelets in digital signal processing. Signals Technical Publishing, 2009.
- [12] Wagenaar, P., Wouters, P.A.A.F., Van Der Wielen, P.C.J.M. and Steennis, E. F., Accurate estimation of the time-of-arrival of partial discharge pulses in cable systems in service. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 15 (4), pp. 1190-1199, 2008. DOI: 10.1109/TDEI.2008.4591242
- [13] Nikolski, V.V., Electrodinámica y propagación de ondas de radio. Moscú, URSS: Editorial MIR, 671 P., 1976.
- [14] Su, Q., Analysis of partial discharge pulse propagation along generator stator windings. [Online]. Power Engineering Society Winter Meeting, pp. 3-6, 2000. Available at: [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=849969](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=849969)
- [15] Gross, D.W., Signal transmission and calibration of on-line partial discharge measurements. [Online]. In Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, pp. 335-338, 2003. Available at: <http://doi:10.1109/ICPADM.2003.1218420>
- [16] Hayt, W. and Buck, J., Teoría Electromagnética, Mc Graw Hill, 2012.
- [17] Jackson, J.D., Classical Electrodynamics, Wiley, 1998.
- [18] Götting, B., Analyse multi-capteurs de signaux transitoires issus de systèmes électriques. PhD Thesis., Université de Grenoble, France., 2010.
- [19] Clark, D., Mackinlay, R., Giussani, R., Renforth, L. and Shuttleworth, R., Partial discharge pulse propagation, localisation and measurements in medium voltage power cables. In 2013 48th International Universities' Power Engineering Conference (UPEC), pp. 1-6, 2013. DOI: 10.1109/UPEC.2013.6714937
- [20] Bartnikas, R., A comment concerning the rise times of partial discharge pulses IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 12 (2), pp. 196-202, 2005. DOI: 10.1109/TDEI.2005.1430390

**J.L. Oslinger-Gutiérrez**, completed his BSc. Eng in Electrical Engineering in 1996, and his PhD degree in Electrical Engineering in 2007, all of them at Universidad del Valle, Cali, Colombia. Currently, he is a Full Professor at the Electrical and Electronic School, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, Colombia. His research interests include: design, simulation, modeling and diagnosis of electrical machines.

**F.A. Muñoz-Muñoz**, completed his BSc. Eng in Electrical Engineering in 2011 at Universidad del Valle, Cali, Colombia. Currently, he is a PhD student at the Electrical and Electronic School, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, Colombia. His research interests include: simulation, modeling and diagnosis of electrical machines.

**J.A. Vanegas-Iriarte**, completed his BSc. Eng in Electrical Engineering in 2012 at Universidad del Valle, Cali, Colombia. Currently, he is a MSc. student at the Electrical and Electronic School, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, Colombia. His research interests include: simulation, modeling and diagnosis of electrical machines.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN  
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería  
Eléctrica e Ingeniería de Control

Oferta de Posgrados

Maestría en Ingeniería - Ingeniería Eléctrica

Mayor información:

E-mail: [ingelcontro\\_med@unal.edu.co](mailto:ingelcontro_med@unal.edu.co)  
Teléfono: (57-4) 425 52 64

# An improvement to the classification based on the measurement of the similarity quality using fuzzy relations

Yumilka B. Fernández-Hernández <sup>a</sup>, Yaima Filiberto <sup>a</sup>, Mabel Frias <sup>a</sup>, Rafael Bello <sup>b</sup> & Yaile Caballero <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Facultad de Informática, Universidad de Camagüey, Camagüey, Cuba. {yumilka.fernandez, yaima.filiberto, mabel.frias, yaile.caballero}@reduc.edu.cu

<sup>b</sup> Centro de Estudios Informáticos, Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, Cuba. rbellop@uclv.edu.cu

Received: October 10<sup>th</sup>, 2014. Received in revised form: May 4<sup>th</sup>, 2015. Accepted: June 3<sup>rd</sup>, 2015.

## Abstract

The learning of classification rules is a classic problem of the automatic learning. The algorithm IRBASIR for the induction of classification rules based on similarity relations allows to discover knowledge starting from decision systems that contain features with continuous and discrete domains. This algorithm has shown to obtain higher results than other well-known algorithms. In this article, several modifications to this algorithm based on the Fuzzy sets theory are proposed, taking into account the measure quality of similarity. The experimental results show that using the fuzzy sets theory allow to obtain higher results than the original algorithm.

**Keywords:** classification rules; fuzzy sets; similarity relations.

# Una mejora a la clasificación basada en la medida calidad de la similaridad utilizando relaciones borrosas

## Resumen

El aprendizaje de reglas de clasificación es un problema clásico del aprendizaje automático. El algoritmo IRBASIR para la inducción de reglas de clasificación basado en relaciones de similaridad permite descubrir conocimiento a partir de sistemas de decisión que contienen rasgos tanto discretos como continuos. El mismo ha mostrado obtener resultados superiores a otros algoritmos conocidos en este tema. En este artículo se proponen varias modificaciones a este algoritmo basadas en la Teoría de los Conjuntos Borrosos, debido a las ventajas que estos poseen, teniendo en cuenta la medida calidad de similaridad. Los resultados experimentales muestran que utilizando la Teoría de los Conjuntos Borrosos se obtienen resultados estadísticamente superiores al algoritmo original.

**Palabras clave:** reglas de clasificación; conjuntos borrosos; relaciones de similaridad.

## 1. Introducción

En este artículo se propone el empleo de relaciones borrosas en el algoritmo IRBASIR [1] el cual es un método de inducción de reglas de clasificación cuya principal ventaja es su utilización para sistemas de decisión con rasgos de condición heterogéneos, es decir, pueden existir tanto rasgos discretos como continuo. El mismo se distingue de otros métodos en que no requiere discretizar los dominios continuos, y la parte condicional de la regla no se expresa como una conjunción de condiciones elementales. El algoritmo se basa en el empleo de una relación de similaridad que permite construir las clases de similaridad de los objetos.

Este algoritmo busca el conjunto mínimo de reglas siguiendo una estrategia de cubrimiento secuencial, para lo cual construye clases de similaridad de los objetos del sistema de decisión. Teniendo en cuenta estas características se proponen tres modificaciones a este algoritmo basadas en el uso de las relaciones borrosas por las ventajas que estas presentan y que se mencionan a continuación.

El tema de las relaciones borrosas es analizado por L.A. Zadeh en [2], en el cual se propone un marco conceptual unificado para el tratamiento de las relaciones. Las relaciones borrosas proporcionan un mayor grado de libertad para expresar las preferencias humanas y permiten cierta tolerancia [3,4]. Como un elemento importante de la

SoftComputing [5], el uso de las relaciones borrosas hace los métodos computacionales más flexibles y tolerantes a la imprecisión, especialmente en el caso de datos mezclados (variables continuas y discretas).

Zadeh amplió la teoría clásica de conjuntos para poder operar con clases definidas por predicados vagos y logró esa ampliación generalizando el concepto de pertenencia a un conjunto  $A$  para el que sólo existían, hasta ese momento, dos posibilidades:  $x$  pertenece a  $A$  o  $x$  no pertenece a  $A$ , que expresado mediante la función característica o de elección de Boole se representa por  $\mu_A(x) = 1$  o  $\mu_A(x) = 0$ , respectivamente. Zadeh introdujo la idea de los conjuntos borrosos  $\tilde{A}$ , caracterizados por funciones características generalizadas o funciones de pertenencia  $\mu_{\tilde{A}}$ , cuyos valores no son sólo los números 0 y 1, sino todos los números entre 0 y 1; la pertenencia dejó de ser abrupta para ser graduada.

En los conjuntos borrosos la pertenencia a un conjunto es cuestión de grados entre el “pertenece” y “no pertenece”, entre “verdadero” y “falso”, son los grises situados entre el blanco y el negro. Generalizamos entonces la función característica, de modo tal que pueda tomar cualquier valor real del intervalo  $[0, 1]$ .

Sea  $E$  un conjunto continuo o discreto, se llama **subconjunto borroso** de  $E$  (en inglés *fuzzy set*) a todo conjunto de pares ordenados (1):

$$\tilde{A} = \left\{ \left( x / \mu_{\tilde{A}}(x) \right), \forall x \in E \right\} \quad (1)$$

Donde:  $\mu_{\tilde{A}} : E \rightarrow [0, 1]$  es la función característica de pertenencia y  $\mu_{\tilde{A}}(x)$  es el grado o nivel de pertenencia de  $x$  a  $E$ .

La teoría de los conjuntos borrosos es ampliamente usada para resolver y analizar problemas en diferentes ramas de las investigaciones [6].

Por su parte los conjuntos aproximados han demostrado ser efectivos para el análisis de datos, siendo el aprendizaje automático una de las áreas de trabajo donde mayor interés ha despertado.

La Teoría de Conjuntos Aproximados (Rough Sets Theory, RST) fue introducida por Z. Pawlak en 1982 [7]. La filosofía de los conjuntos aproximados se basa en aproximar cualquier concepto, un subconjunto duro del dominio como por ejemplo, una clase en un problema de clasificación supervisada, por un par de conjuntos exactos, llamados aproximación inferior y aproximación superior del concepto. Con esta teoría es posible tratar tanto datos cuantitativos como cualitativos, y en particular son útiles para tratar la incertidumbre causada por inconsistencias en la información; la inconsistencia describe una situación en la cual hay dos o más valores en conflicto para ser asignados a una variable [8].

Entre las ventajas de la RST para el análisis de datos está que solo se basa en los datos originales y no necesita cualquier información externa; no es necesaria ninguna suposición acerca de los datos [9].

Se ha utilizado en muchas investigaciones el uso de los conjuntos borrosos unido al uso de los conjuntos aproximados [10], lo cual se denomina Conjuntos Borrosos Aproximados (Fuzzy Rought Set).

Los Conjuntos Borrosos Aproximados han tenido amplia aplicación en la rama del aprendizaje- máquina, pero también ha sido útil para la recuperación de la información mejorada [11] y se han presentado trabajos sobre la aplicación de estos conjuntos en el contexto de los Sistemas de Información de Investigación Actuales (CRISs) (Current Research Information Systems) [12].

Teniendo en cuenta las características de los conjuntos borrosos y los conjuntos aproximados, se le han realizado modificaciones al algoritmo IRBASIR que es utilizado para el descubrimiento de reglas de clasificación.

El mismo está basado en la medida calidad de la similaridad, lo cual conlleva a que su desempeño depende del uso de algunos parámetros, entre ellos dos umbrales que permiten definir la similaridad entre los objetos (expresiones (2) y (3)); la novedad de este trabajo radica en usar los conjuntos borrosos para facilitar el uso de algunos parámetros en el algoritmo IRBASIR.

## 2. Trabajos relacionados

En la literatura [13] se utilizan diferentes algoritmos para clasificación de reglas, dentro de los más conocidos se encuentran LEM2, EXPLORE y MODLEM. El primero basa su funcionamiento en tratar de encontrar un subconjunto mínimo de reglas que permita realizar la clasificación. LEM2 resuelve la inconsistencia usando la teoría de los conjuntos aproximados.

Por su parte el algoritmo EXPLORE extrae de los datos todas las reglas de decisión que cumplen determinados requisitos. El algoritmo puede manejar ejemplos inconsistentes ya sea mediante el uso de la teoría de los conjuntos aproximados, para definir las aproximaciones de las clases de decisión, o mediante la determinación de umbral apropiado para la confianza de las normas inducidas a ser utilizados en la pre-poda.

El algoritmo MODLEM realiza un cubrimiento secuencial generando un conjunto mínimo de reglas de decisión para cada concepto de decisión (clase de decisión y en caso de ejemplos inconsistentes). Este conjunto mínimo de reglas (también llamado cubrimiento local) intenta cubrir todos los ejemplos positivos del concepto de decisión dado.

En [14] se proponen 3 técnicas para clasificación de reglas en conjuntos que tienen datos de tipo numérico, estas técnicas llevan en su proceso la discretización de los mismos.

En [1] se propone el algoritmo IRBASIR. Este algoritmo permite descubrir conocimiento a partir de sistemas de decisión que contienen tanto rasgos con dominio discreto como continuo, pues la diferencia entre ambos tipos de dominios sólo radica en la función de comparación de rasgos que se utilice; lo cual hace que no requiera realizar ningún proceso de discretización, ni antes del aprendizaje como ID3 o LEM2 ni durante el aprendizaje como C4.5 o MODLEM.

## 3. Medida calidad de la similaridad basada en conjuntos borrosos

El método de construcción de relaciones de similaridad propuesto en [15] se basa en la medida calidad de la similaridad y esta a su vez en las relaciones  $R1$  y  $R2$  definidas por las expresiones (2) y (3):

$$xR_1y \text{ si y sólo si } F_1(x, y) \geq e_1 \quad (2)$$

$$xR_2y \text{ si y sólo si } F_2(x, y) \geq e_2 \quad (3)$$

donde la función  $F1(x,y)$  se define por la expresión (4):

$$F1(X, Y) = \sum_{i=1}^n w_i * \partial_i(X_i, Y_i) \quad (4)$$

donde:  $n$  es la cantidad de rasgos;  $w_i$  es el peso del rasgo  $i$ ;  $X_i, Y_i$  son los valores del rasgo  $i$  en los objetos  $X, Y$  respectivamente;  $\partial_i$  es la función de comparación para el rasgo  $i$ . Así de esta forma, el cálculo de la inseparabilidad entre dos objetos depende del conjunto de pesos  $w_i$ , pues usualmente las funciones de comparación de los rasgos se conocen.

Este enfoque tiene el problema de necesitar los umbrales  $e1$  y  $e2$ , los cuales se convierten en parámetros del método, y como es conocido los parámetros pueden introducir grados de dificultad en el desempeño de los algoritmos. Seguidamente se propone un enfoque basado en el empleo de conjuntos borrosos para flexibilizar el papel de los umbrales  $e1$  y  $e2$ .

Las relaciones (2) y (3) se sustituyen por las relaciones (5) y (6):

$$xR_1y \text{ si y sólo si } F_1(x, y) \text{ es } Alta1 \quad (5)$$

$$xR_2y \text{ si y sólo si } F_2(x, y) \text{ es } Alta2 \quad (6)$$

donde  $Alta1$  y  $Alta2$  son conjuntos borrosos definidos por las expresiones (7) y (8) para calificar la similaridad entre los objetos  $x$  e  $y$  respecto a los rasgos de condición y el rasgo de decisión respectivamente. Los valores utilizados en (7) y (8) se deben a los buenos resultados obtenidos con estos.

Alta 1

$$S(x;0.70) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq 70, \\ 2((x-0.70)^2)/(1+2(x-0.70)^2) & \end{cases} \quad (7)$$

Alta 2

$$S(x;0.75,0.85,0.90) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq 0.75, \\ 2((x-0.75)/(0.90-0.75))^2 & \text{si } 0.75 \leq x \leq 0.85, \\ 1-2((x-0.90)/(0.90-0.75))^2 & \text{si } 0.85 \leq x \leq 0.90, \\ 1 & \text{si } x \geq 0.90 \end{cases} \quad (8)$$

Nótese que definidas de esta forma las relaciones  $R_1$  y  $R_2$  son relaciones binarias borrosas según [16].

A partir de los conjuntos borrosos  $Alta1$  y  $Alta2$  se pueden construir los conjuntos borrosos  $N_1(x)$  y  $N_2(x)$  según las expresiones (9) y (10):

$$N_1(x) = \{(y, \varphi_{Alta1}(F_1(x, y))), \forall y \in U\} \quad (9)$$

$$N_2(x) = \{(y, \varphi_{Alta2}(F_2(x, y))), \forall y \in U\} \quad (10)$$

El grado de similaridad entre ambos conjuntos para un objeto  $x$  se calcula como la semejanza entre los conjuntos borrosos  $N_1(x)$  y  $N_2(y)$  [17] mediante la expresión (11):

$$N_0(x) = s(N_1(x), N_2(x)) = \frac{\sum_{i=1}^n [1 - |\varphi_{Alta1}(x_i) - \varphi_{Alta2}(x_i)|]}{n} \quad (11)$$

Usando la expresión (11) la medida calidad de la similaridad de un sistema de decisión (Decision System, DS) con un universo de  $N$  objetos se define por (12):

$$\theta(DS) = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N N_0(x)}{N} \right\} \quad (12)$$

#### 4. Algoritmo IRBASIR y nuevas modificaciones

##### 4.1. Algoritmo IRBASIR (Inducción de Reglas Basado Enrelaciones de Similaridad)

El algoritmo IRBASIR funciona teniendo en cuenta que dado un sistema de decisión  $DS=(U, A \cup \{d\})$ , con  $m$  objetos, el conjunto  $A$  contiene  $n$  rasgos de dominios continuos o discretos.

P1. Definir las medidas de similaridad locales.

Construir las funciones de comparación de rasgos  $\partial_i(x,y)$  para cada rasgo en  $A$ , tales que permiten comparar los valores de ese rasgo; por ejemplo la expresión (13)

$$\partial(x, y) = \begin{cases} 1 - \frac{|X_i - Y_i|}{\text{Max}(N_i) - \text{Min}(N_i)} & \text{si } i \text{ es continuo} \\ 1 & \text{si } i \text{ es discreto y } X_i = Y_i \\ 0 & \text{si } i \text{ es discreto y } X_i \neq Y_i \end{cases} \quad (13)$$

P2. Construir una relación de similaridad  $R$ , como la definida por (2) donde  $F1$  puede estar definida como (4).

P3. Construir reglas de clasificación según el procedimiento GenRulesRST basado en  $R$ .

Activar GenRulesRST.

Para encontrar los valores  $w_i$  para (4) se propone usar el método PSO+RST publicado en [18]. El procedimiento GenRulesRST genera reglas de clasificación y sus correspondientes valores de certidumbre.

### Procedimiento GenRulesRST

Este es un procedimiento iterativo en el cual se buscan objetos del sistema de decisión no tenidos en cuenta previamente, se construye su clase de similaridad usando una relación de similaridad y se construye una regla de la forma Si  $\sum w_i * \partial_i() \geq \varepsilon$  entonces  $Q$  que cubra los objetos que tienen como valor de decisión la clase mayoritaria en la clase de similaridad. Se usa un arreglo de  $m$  componentes, denominado  $Usado[]$ , en el cual  $Usado[i]$  tiene un valor 1 si el objeto ya fue usado por el procedimiento GenRulesRST, ó 0 en otro caso.

P1: Inicializar contador de objetos

$Usado[j] \leftarrow 0$ , para  $j=1, \dots, m$   
 $RulSet \leftarrow \phi$   
 $i \leftarrow 0$

P2: Comienza procesamiento del objeto  $O_i$

$i \leftarrow$  índice del primer objeto no usado

Si  $i=0$  entonces Fin del proceso de generación de reglas.

Sino  $Usado[i] \leftarrow 1$

P3: Construir la clase de similaridad del objeto  $O_i$  según

$R$

Calcular  $[O_i]R$   $[x]R$  denota la clase de similaridad del objeto  $x$

P4: Generación de una regla de decisión

Si  $|\phi([O_i]R)|=1$  entonces  $\{/*$  Construir la regla que describa esta clase de similaridad con consecuente igual al valor de decisión del objeto  $O_i/*$

$k \leftarrow d(O_i)$   
 $C \leftarrow [O_i]R$   
 $\}$

Sino  $\{/*$  Construir la regla que describa esta clase de similaridad con consecuente igual al valor de decisión mayoritario en  $[O_i]R /*$

$k \leftarrow$  valor de decisión mayoritario de los objetos en  $[O_i]R$

$C \leftarrow$  objetos de  $[O_i]R$  con clase  $k$

$\}$

Activar GenRulSim( $k$ ,  $[O_i]R$ ,  $C$ ; Rul)  $/*$  este procedimiento construye una regla de decision\*/

$RulSet \leftarrow RulSet \cup \{ Rul \}$

P5: Marcar como usados a todos los objetos en  $C$  cubiertos por la regla Rul y con consecuente  $k$ .

P6: Ir a P2

Donde  $|\phi([O_i]R)|$  denota la cantidad de valores de decisión distintos de los objetos en la clase de similaridad  $[O_i]R$ .

### Procedimiento GenRulSim( $k$ , $C_s$ , $C$ ; Rul)

Este procedimiento construye una regla de decisión que se retorna en Rul a partir de los parámetros de entrada  $k$  (denota una clase de decisión),  $C_s$  (clase de similaridad del objeto que se procesa) y  $C$  (subconjunto de  $C_s$  conteniendo solo los objetos de clase  $k$ ).

P1: Construir un vector  $P$  con  $n$  componentes de referencia (uno para cada rasgo de condición) para el conjunto de objetos en  $C$ .

$P(i) \leftarrow f(V_i)$ , donde  $V_i$  es el conjunto de valores del rasgo  $i$  en los objetos en  $C$

P2: Generar la regla a partir del vector de referencia  $P$ .

$Rul \leftarrow If w_1 * \partial_1(X_1, P_1) + \dots + w_n * \partial_n(X_n, P_n) \geq \varepsilon$  then  $d=k$

Donde los pesos  $w_i$  son tomados de la función  $F1$ , expresión (4);  $\varepsilon$  es el umbral usado en la relación de similaridad  $R$ ;  $P_i$  es el valor del rasgo  $i$  en el vector de referencia  $P$ ; y  $\partial_i$  es la función de comparación para el rasgo  $i$ .

P3: Calcular la certidumbre de la regla.

Considerar las medidas de accuracy (Acc) y coverage (Cov):

$$Acc(Rul) = \frac{|A(Rul) \cap C|}{|A(Rul)|} \quad (14)$$

$$Cov(Rul) = \frac{|A(Rul) \cap C|}{|C|} \quad (15)$$

Donde  $A(Rul)$  es el conjunto de objetos en  $C_s$  para los cuales el antecedente de la regla  $Rul$  se cumple.

En el paso P1 de *GenRulSim* la función  $f$  denota un operador de agregación; por ejemplo: Si los valores en  $V_i$  son reales se debe usar el promedio, si son discretos, la moda. El propósito es construir un prototipo o centroide para un conjunto de objetos similares. Aquí se ha usado un enfoque parecido a como se hace en el algoritmo k-mean [19].

### 4.2. Modificaciones al algoritmo IRBASIR.

El uso de relaciones borrosas plantea un problema para usar el algoritmo IRBASIR para descubrir reglas de decisión, ya que este se basa en utilizar la clase de similaridad de un objeto para a partir de ella construir un prototipo de esa clase de similaridad, y usando el prototipo se construye la regla de decisión. Pero ahora la clase de similaridad contiene todos los objetos, lo que con un grado distinto de pertenencia, de modo que no es posible construir el prototipo de cada clase de similaridad. Seguidamente se proponen varias alternativas para construir la clase de similaridad, y a partir de ella poder usar el algoritmo IRBASIR.

**Variante 1 (IRBASIRV1-F):** Modificación del Paso 2 al Algoritmo IRBASIR[1], utilizando la Reducción al caso duro usando un alfa-corte[20].

Una alternativa para enfrentar el problema es usar una relación dura para construir la clase de similaridad, para lo cual se puede usar un enfoque basado en el concepto de alfa-corte. De modo que la clase de similaridad de un objeto  $x$  se define por la expresión (16):

$$[x]_R = \{y \in U : \varphi_{Alt1}(F1(x, y)) \geq \sigma\} \quad (16)$$

Donde  $\sigma$  se utiliza con el valor 0.70, pues con ese valor los resultados obtenidos son mejores. Y se utiliza ese mismo valor de sigma como umbral para construir la condición de la regla de decisión que se genera a partir de esta clase de

similaridad.

**Variante 2(IRBASIRV2-F):** Modificación del Algoritmo IRBASIR[1] en el Paso 2, utilizando cardinalidad media.

En [21] se define el concepto de cardinalidad de un gránulo de información borroso (fuzzy information granule) de la forma siguiente:

Sea un universo de objetos  $U=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  y una relación binaria borrosa (fuzzy binary relation)  $R$ , donde  $r_{ij}$  es el grado en que el objeto  $x_i$  es similar al objeto  $x_j$ . Entonces la cardinalidad del gránulo  $S_R(x_i)$  se define por la expresión (17)

$$|S_R(x_i)| = \sum_{j=1}^n r_{ij} \quad (17)$$

Basándose en esta definición se propone construir la clase de similaridad de un objeto  $x_i$  como el conjunto de objetos del universo cuyo grado de similaridad con  $x_i$  sea superior a la cardinalidad media del gránulo  $S_R(x_i)$ , y se define por la expresión (18):

$$[x]_R = \{y \in U : Fl(x, y) \geq |S_R(x)|/n\} \quad (18)$$

**Variante 3 (IRBASIR-V3):** Modificación del método de cálculo de peso utilizado por IRBASIR (en el Paso 2[18]) para encontrar el conjunto de pesos, utilizando *Alta 1* y *Alta 2* (7) y (8).

El peso de los atributos utilizando los conjuntos borrosos se calculó usando las expresiones (7) y (8) para *Alta 1* y *Alta 2*, respectivamente.

## 5. Resultados experimentales

Con el fin de evaluar la precisión de las modificaciones propuestas se realizó el siguiente estudio. Se compararon las modificaciones con el algoritmo original IRBASIR [1] y con IRBASIR-RED [22] y el que obtuvo mejores resultados se comparó con 4 algoritmos: C4.5 implementado en la herramienta KEEL [23]; LEM2, MODLEM y EXPLORE de la herramienta ROSE2.

Tabla 1.  
Descripción de los conjuntos de datos

| Conjuntos de Datos | Cantidad De Rasgos | Cantidad De objetos |       |
|--------------------|--------------------|---------------------|-------|
| Breast-w           | 9                  | 683                 | V1    |
| Cleveland          | 13                 | 297                 | V2    |
| Ecoli              | 7                  | 336                 | V3    |
| Iris               | 4                  | 150                 | IDEM  |
| Heart-statlog      | 13                 | 270                 | V2    |
| Pima               | 8                  | 768                 | V3    |
| Wine               | 13                 | 178                 | IRB   |
| Biomed             | 8                  | 194                 | V3 V2 |
| Wisconsin          | 9                  | 699                 | V3    |
| Diabetes           | 8                  | 768                 | V1 V2 |
| Wave form          | 40                 | 5000                | V2    |
| Sonar              | 60                 | 208                 | RED   |
| Mfeat-zernike      | 47                 | 2000                | V3    |
| Mfeat-fourier      | 76                 | 2000                | RED   |
| Optdigits          | 64                 | 5620                | V1    |

Source: The authors.

Para realizar los experimentos se seleccionaron 15 conjuntos de datos tomados de University of California, Irvine (UCI) repository [24] que fueron particionados utilizando validación cruzada 10 fcv (tenfold crossvalidation) [25]. En la Tabla 1 se resumen las propiedades de los conjuntos de datos seleccionados.

Experimento 1: Comparar los resultados de precisión de los métodos propuestos para cada uno de los conjuntos de datos, para las diez particiones que se realizaron.

Objetivo: Determinar cuál de los algoritmos propuestos es significativamente superior al resto, en cuanto a la exactitud general de la clasificación. En la Tabla 2 se muestran los resultados experimentales de la comparación entre los algoritmos.

Experimento 2: Comparar la precisión del mejor de los algoritmos propuestos con el resto de los clasificadores para cada uno de los conjuntos de datos, para las diez particiones que se realizaron.

Objetivo: Determinar si este método es significativamente superior o al menos similar, al resto de los algoritmos, en cuanto a la exactitud general de la clasificación.

En la Tabla 2 se muestran los resultados experimentales de la comparación entre los algoritmos. Al final de cada columna está el valor promediado de cada algoritmo. Para comparar los resultados se utilizaron test de comparaciones múltiples con el fin de encontrar el mejor algoritmo.

Según los resultados obtenidos en la Tabla 2 se puede observar que IRBASIRV1-F e IRBASIRV3- obtienen mejores resultados para bases pequeñas con pocos atributos (breast-w, ecolí, diabetes, pima, biomed, wisconsin), para bases pequeñas con una cantidad mayor de atributos IRBASIRV2-F realiza mejor la clasificación. Los resultados para bases grandes demuestran que si son menos atributos (waveform, mfeat-zernike) la clasificación la realiza mejor IRBASIRV2-F e IRBASIRV3-, con más atributos (64) obtiene mejores resultados IRBASIRV1-F; mientras que con 76 atributos(mfear-fourier), el algoritmo IRBASIR-RED, que utiliza selección de atributos es mejor.

En la Tabla 3 se puede observar que el mejor ranking entre los algoritmos propuestos lo tiene IRBASIR-V3. El Test de Iman–Davenport (F-distribution con 2 y 28 grados de libertad) fue empleado con el fin de encontrar diferencias significativas entre los algoritmos propuestos, obteniendo mediante el Test de Friedman valor de p-value: 0.386741. De esta forma en la Tabla 4 se muestran los resultados del procedimiento de Holm para comparar los algoritmos propuestos.

En la Tabla 5 se puede observar como la precisión de la clasificación es mejor para el algoritmo seleccionado (IRBASIR-V3) teniendo en cuenta el promedio general de la misma.

Como se puede observar en las Tablas 6 y 7 el método IRBASIR-V3 es significativamente superior a LEM2, MODLEM, EXPLORE, C4.5, IRBASIR-RED e IRBASIR.

Teniendo en cuenta los resultados de los experimentos 1 y 2 el algoritmo que obtiene mejores resultados de forma general, valorando el promedio general de la clasificación de todas las bases es el algoritmo IRBASIR-V3.

Tabla 2.

Comparación entre las diferentes modificaciones al algoritmo IRBASIR.

| CD            | IRBASIR | IRBASIR- RED | IRBASIR-V3 | IRBASIRV1-F | IRBASIRV2-F |
|---------------|---------|--------------|------------|-------------|-------------|
| Breast-w      | 95.15   | 96.31        | 96.88      | 97.03       | 96.16       |
| Cleveland     | 58.25   | 58.57        | 58.91      | 59.93       | 60.97       |
| Ecoli         | 80.09   | 79.75        | 81.83      | 81.27       | 73.55       |
| Iris          | 96.00   | 96.00        | 96.00      | 79.33       | 96.00       |
| Heart-statlog | 79.63   | 81.74        | 84.07      | 83.70       | 84.81       |
| Pima          | 75.26   | 75.78        | 77.21      | 76.04       | 75.39       |
| Wine          | 97.78   | 93.86        | 97.18      | 97.22       | 96.63       |
| Biomed        | 87.16   | 87.67        | 89.71      | 89.24       | 89.71       |
| Wisconsin     | 96.30   | 95.26        | 97.22      | 97.21       | 95.76       |
| Diabetes      | 74.93   | 75.65        | 75.78      | 75.91       | 75.91       |
| Wave form     | 80.46   | 80.78        | 81.72      | 71.78       | 82.12       |
| Sonar         | 83.21   | 83.83        | 78.81      | 74.52       | 79.76       |
| Mfeat-zernike | 77.85   | 78.05        | 78.30      | 62.45       | 68.00       |
| Mfeat-fourier | 79.00   | 79.24        | 78.85      | 65.85       | 73.70       |
| Optdigits     | 93.98   | 94.07        | 93.74      | 94.73       | 89.66       |
| PROMEDIOS     | 83.67   | 83.77        | 84.41      | 80.41       | 82.54       |

Source: The authors.

Tabla 3.

Resultados de la prueba estadística de Friedman entre los resultados de las modificaciones de IRBASIR.

| Algoritmos  | Ranking |
|-------------|---------|
| IRBASIR-V3  | 1.7333  |
| IRBASIRV1-F | 2.2333  |
| IRBASIRV2-F | 2.0333  |

Source: The authors.

Tabla 4.

Tabla de Holm para  $\alpha = 0.025$ , con IRBASIR-V3 como método de control.

| i | Algoritmos  | $z=(R0-Ri)/SE$ | p        | Holm  | Hipótesis |
|---|-------------|----------------|----------|-------|-----------|
| 2 | IRBASIRV1-F | 1.369306       | 0.170904 | 0.025 | Rechaza   |
| 1 | IRBASIRV2-F | 0.821584       | 0.411314 | 0.05  | Acepta    |

Source: The authors.

Tabla 5.

Comparación entre el algoritmo IRBASIR-V3 y el resto de los algoritmos.

| CD            | C4.5  | MODLEM | LEM2  | EXPLORE | IRBASIR-V3 |
|---------------|-------|--------|-------|---------|------------|
| Breast-w      | 94.57 | 93.99  | 95.16 | 89.13   | 96.88      |
| Cleveland     | 54.43 | 57.55  | 47.84 | 52.90   | 58.91      |
| Ecoli         | 79.47 | 75.70  | 52.97 | 0.60    | 81.83      |
| Iris          | 94.67 | 94.00  | 94.00 | 88.00   | 96.00      |
| Heart-statlog | 77.68 | 75.19  | 75.19 | 81.85   | 84.07      |
| Pima          | 75.26 | 74.23  | 65.89 | 60.29   | 77.21      |
| Wine          | 93.30 | 96.08  | 86.44 | 68.63   | 97.18      |
| Biomed        | 86.53 | 85.00  | 66.50 | 66.63   | 89.71      |
| Wisconsin     | 95.56 | 94.28  | 95.75 | 89.41   | 97.22      |
| Diabetes      | 74.47 | 74.09  | 64.59 | 60.67   | 75.78      |
| Wave form     | 75.10 | 70.26  | 59.82 | 0.00    | 81.72      |
| Sonar         | 78.35 | 69.81  | 61.57 | 57.71   | 78.81      |
| Mfeat-zernike | 70.10 | 53.00  | 1.60  | 0.00    | 78.30      |
| Mfeat-fourier | 75.85 | 57.80  | 0.45  | 0.00    | 78.85      |
| Optdigits     | 90.02 | 78.72  | 79.59 | 0.00    | 93.74      |
| PROMEDIOS     | 81.02 | 76.65  | 63.16 | 47.72   | 84.41      |

Source: The authors.

## 6. Conclusiones

En este artículo se propusieron tres modificaciones al algoritmo IRBASIR (IRBASIR-V3, IRBASIRV1-F, IRBASIRV2-F)

Tabla 6.

Resultados de la prueba estadística de Friedman entre los clasificadores. Iman-Davenport (distribución de F con 6 y 84 grados de libertad) valor de p: 0

| Algoritmos  | Ranking |
|-------------|---------|
| C4.5        | 4.1     |
| MODLEM      | 5.1333  |
| LEM2        | 5.6667  |
| EXPLORE     | 6.5333  |
| IRBASIR     | 2.3667  |
| IRBASIR-RED | 2.6     |
| IRBASIR-V3  | 1.6     |

Source: The authors.

Tabla 7.

Prueba de Holm para  $\alpha=0.025$ , tomando como método de control IRBASIR-V3.

| i | Algoritmos  | $z=(R0-Ri)/SE$ | p        | Holm     | Hipótesis |
|---|-------------|----------------|----------|----------|-----------|
| 6 | EXPLORE     | 6.254141       | 0        | 0.008333 | Rechaza   |
| 5 | LEM2        | 5.155441       | 0        | 0.01     | Rechaza   |
| 4 | MODLEM      | 4.479318       | 0.000007 | 0.0125   | Rechaza   |
| 3 | C4.5        | 3.169328       | 0.001528 | 0.016667 | Rechaza   |
| 2 | IRBASIR-RED | 1.267731       | 0.204894 | 0.025    | Rechaza   |

Source: The authors.

utilizando relaciones de similaridad borrosas, y se realizaron estudios que incluyeron la comparación con otros métodos. Teniendo presente que los algoritmos no obtienen el mismo comportamiento para todas las bases, los resultados experimentales muestran que de todos los algoritmos IRBASIR-V3, donde se modifica el método de cálculo de peso en el Paso 2 [23] que utiliza IRBASIR, utilizando conjuntos borrosos, obtiene resultados estadísticamente superiores que los demás.

## Referencias

- [1] Filiberto, Y. y Bello, R., Algoritmo para el aprendizaje de reglas de clasificación basado en la teoría de los conjuntos aproximados extendida, DYNA 78 (169), pp. 62-70, 2011.
- [2] Zadeh, L.A., Similarity relations and fuzzy orderings, Information Sciences 3, pp. 177-200, 1971.

- [3] Bodenhofer, U., A similarity-based generalization of fuzzy orderings preserving the classical axioms. *International Journal on Uncertainty and Fuzziness Knowledge-Based Systems*, 8 (5), pp. 593-610, 2000. DOI: 10.1142/S0218488500000411
- [4] Martín, G., Cornelis, C. and Naessens H., Personalizing information retrieval in CRISs with fuzzy sets and rough sets, *Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Current Research Information Systems (CRIS2008)*, pp. 51-59, 2008.
- [5] Verdegay, J.L., Yager R.R. and Bonissone P.P., On heuristics as a fundamental constituent of soft computing. *Fuzzy Sets and Systems* 159, pp. 846-855, 2008. DOI: 10.1016/j.fss.2007.08.014.
- [6] Mendel, J.M., *Uncertain rule-based fuzzy logic systems*, Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, New Jersey, 2001.
- [7] Pawlak, Z., *Rough Sets*. *International Journal of Computer and Information Sciences* 11, pp. 341-356, 1982. DOI: 10.1007/BF01001956.
- [8] Parsons, S., Current approaches to handling imperfect information in data and knowledge bases. *IEEE Trans. On knowledge and data engineering*, 8 (3), 1996. DOI: 10.1109/69.506705.
- [9] Tay, F.E. and Shen, L., Economic and financial prediction using rough set model. *European Journal of Operational Research* 141, pp.641-659, 2002. DOI: 10.1016/S0377-2217(01)00259-4.
- [10] Cornelis, C., De Cock, M. and Kerre, E., Intuitionistic fuzzy rough sets: At the crossroads of imperfect knowledge *Expert Systems*, 20 (5), pp. 260-270, 2003. DOI: 10.1111/1468-0394.00250.
- [11] De Cock, M. and Cornelis, C., Fuzzy rough set based web query expansion, *Proceedings of Rough Sets and Soft Computing in Intelligent Agent and Web Technology*, *International Workshop at WIAT2005*, pp. 9-16, 2005.
- [12] Magalhães, S.T., *Rough Sets*, *International Journal of Computer and Information Sciences* 11 (5), pp. 341-356, 1982.
- [13] Charchalis, A. and Pawletko, R., The use of expert system for marine diesel engine diagnosis. *Zeszyty Naukowe Akademii marynarki Wojennej Rok LIII NR 1 (188)*, pp. 49-56, 2012.
- [14] Grzymala-Busse, J., Three strategies to rule induction from data with numerical attributes. *Transactions on Rough Sets II*, LNCS 3135, pp. 54-62, 2004. DOI: 10.1007/978-3-540-27778-1\_4
- [15] Filiberto, Y., Caballero, Y., Larua, R. and Bello, R., A method to build similarity relations into extended rough set theory, In: *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA 2010)*, pp. 1314-1319, 2010. DOI: 10.1109/ISDA.2010.5687091.
- [16] Hu Q.H., Xie Z.X. and Yu D.R., Hybrid attribute reduction based on a novel fuzzy-rough model and information granulation, *Pattern Recognition* 40, pp. 3509-3521, 2007. DOI: 10.1016/j.patcog.2007.03.017.
- [17] Wang, W., New similarity measures on fuzzy sets and on elements. *Fuzzy Sets and Systems* 85 (3), pp. 305-309, 1997. DOI: 10.1016/0165-0114(95)00365-7.
- [18] Filiberto, Y., et al., Using PSO and RST to predict the resistant capacity of connections in composite structures, In: *International Workshop on Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICSO 2010)* Springer, pp. 359-370, 2010. DOI: 10.1007/978-3-642-12538-6\_30.
- [19] Xindong, W., Top 10 algorithms in data mining. *Knowledge Information System* 14, pp. 1-37, 2008. DOI: 10.1007/s10115-007-0114-2
- [20] Sivanandam, S.N., Sumathi, S. and Deepa, S.N., *Introduction to fuzzy logic using MATLAB*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. DOI: 10.1007/978-3-540-35781-0.
- [21] Hu, Q.H., Yu, D.R., Xie Z.X. and Liu, J.F., Fuzzy probabilistic approximation spaces and their information measures, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 14 (2), pp. 191-201, 2006., DOI: 10.1109/TFUZZ.2005.864086
- [22] Fernández Y., Bello R., Filiberto Y., F, Frias M., Caballero Y., Effects of using reducts in the performance of the IRBASIR algorithm, *DYNA*, 80 (182), pp. 182-190, 2013.
- [23] Alcalá-Fdez, J., Fernandez, A., Luengo, J., Derrac, J., García, Sánchez, S. and Herrera, L.F. KEEL Data-Mining software tool: Data set repository, integration of algorithms and experimental analysis framework. *Journal of Multiple-Valued Logic and Soft Computing* 17 (2-3) pp. 255-287, 2011.
- [24] Asuncion, A. and Newman D., UCI machine learning repository. A study of the behaviour of several methods for balancing machine learning training data. *SIGKDD Explorations* 6 (1), pp. 20-29, 2007.
- [25] Demsar, J., Statistical comparisons of classifiers over multiple data sets. *Journal of Machine Learning Research* (7), pp. 1-30, 2006.

**Y.B. Fernández-Hernández**, recibió su título de Ing. Informática en 2004 en la Universidad de Camagüey (UC), Cuba y MSc. en Teleinformática en 2006 en la Universidad Central de Las Villas (UCLV), Cuba. Su interés científico se encuentra en la disciplina de la inteligencia artificial, en particular el aprendizaje de máquina, softcomputing, y la toma de decisión. Ha participado en congresos internacionales y con alto nivel científico. Es miembro del Grupo de Investigación en Inteligencia Artificial. ORCID: 0000-0002-9569-5348

**Y. Filiberto**, Recibida en Ing. Informática en 2006 y MSc. en Informática Aplicada en 2008, en la Universidad de Camagüey (UC), Cuba y Dra. en 2012 en la Universidad Central de Las Villas (UCLV), Cuba. Su interés científico se encuentra en la disciplina de la inteligencia artificial, en particular el aprendizaje de máquina, KDD y toma de decisiones. Ha publicado alrededor de 30 trabajos científicos. Actualmente directora de ciencia y técnica en la Universidad de Camagüey, Cuba. ORCID: 0000-0003-2279-2953

**M.Frias**, recibió su título de Licenciado en Ing. Informática de la Universidad de Camagüey, Cuba, en 2011. MSc. en Ciencia de la Computación en 2015. Es profesor de la Facultad de Informática. Su interés científico se encuentra en la disciplina de la inteligencia artificial, en particular el aprendizaje de la máquina y softcomputing. Es miembro del grupo de Investigación en Inteligencia Artificial. ORCID: 0000-0001-7361-6680

**R. Bello**, recibió su título de Licenciado en Cibernética y Matemáticas en la Universidad Central de Las Villas (UCLV), Cuba, en 1982, y Dr. en 1987. Su interés científico se encuentra en la disciplina de inteligencia artificial, sobre todo metaheurísticas, softcomputing, aprendizaje de máquina, y la toma de decisiones. Ha publicado alrededor de 200 trabajos científicos. Es miembro de la Academia Cubana de la Ciencia y el Director del Centro de Estudios en Informática de la UCLV. ORCID: 0000-0001-5567-2638

**Y. Caballero**, recibió su título de Licenciado en Ciencias de la Computación en la Universidad Central de Las Villas (UCLV), Cuba, en 2001, y Dra. en 2007. El interés científico es en la disciplina de inteligencia artificial, en particular metaheurísticas, Softcomputing, aprendizaje de máquina, y la toma de decisión. Ha publicado más de 140 trabajos científicos. Es miembro de la Academia Cubana de la Ciencia. ORCID: 0000-0002-6725-5812

# Thermal and energy evaluation of a novel polymer-ceramic composite as insulation for a household refrigerator

Juan Manuel Belman-Flores, Bárbara González-Rolón, Juan Serrano-Arellano & Sergio Gámez-Arredondo

*Department of Mechanical Engineering, Engineering Division, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato, Salamanca, Gto. Mexico*  
*jfbelman@ugto.mx, barbara@ugto.mx, johnnsear@hotmail.com, sa.gamez@hotmail.com*

Received: October 4<sup>th</sup>, 2014. Received in revised form: April 9<sup>th</sup>, 2015. Accepted: April 23<sup>th</sup>, 2015

## Abstract

This article presents a feasibility study of a new polymer-ceramic composite material applied as a thermal insulator on the surface of a low net volume household refrigerator. This paper describes its manufacture in a succinct manner, and a thermal and energy comparison between the factory refrigerator and the refrigerator with the composite installed. Based on the experiments, it is concluded that when using the composite, the average internal temperature of the fridge is increased by 1°C, for practical and design purposes, the refrigerator still functions below 3°C. It was also found that at stable operating conditions the energy consumption using the composite saves approximately 1.5%. Despite these slight savings, the pyro-expanded perlite composite acts as a thermal isolating material. This material may exhibit better ease of use and thermal, energetic and economic benefits, without omitting the environmental characteristics that they favor.

**Keywords:** household refrigerator; composite; energy consumption; pyro-expanded perlite.

# Evaluación térmica y energética de un nuevo composite polímero-cerámico como aislante en un refrigerador doméstico

## Resumen

Este artículo presenta un estudio de viabilidad de un nuevo material compuesto polímero-cerámico aplicado como aislante térmico sobre una superficie de un refrigerador doméstico de pequeña capacidad volumétrica. Este trabajo describe de manera sucinta su manufactura así como la comparación energética y térmica entre el refrigerador de referencia (cuando sale de fábrica) y el refrigerador con el composite instalado. Experimentalmente, cuando se usa el composite la temperatura interna promedio del frigobar incrementa alrededor de 1°C, que para propósitos prácticos y de diseño, el refrigerador aún funciona por debajo de los 3°C. Además, para condiciones de operación estables, la energía consumida usando el composite ahorra aproximadamente 1.5% en comparación con el refrigerador de referencia. A pesar de este ligero ahorro, la perlita pyro-expandida actúa como material aislante. Este material puede exhibir mejor facilidad de uso y beneficios térmicos, energéticos y económicos, sin omitir las características ambientales a su favor.

**Palabras clave:** refrigerador doméstico; composite; consumo de energía; perlita pyro-expandida.

## 1. Introduction

Presently, companies involved in the production of household appliances face heavy regulations related to energy consumption, emissions of greenhouse gases and environmental impact, among others. Refrigerators are among the most manufactured devices because their use is essential in homes. Refrigerators based on vapor compression are major energy consumers, and its incidence

is increasing in less developed countries. The annual production of refrigerators worldwide in 2009 was approximately 80 million units, which is increasing rapidly [1]. For instance, in Mexico 80% of the housing owns at least one refrigerator, this counts for more than 23 million domestic refrigerators working [2]. In order to evaluate instantaneous domestic power consumptions, a house simulator has been developed [3], in which the household refrigerator is considered an appliance of medium priority

with high energy consumption. In addition, the electric power consumed by a household refrigerator is considered to be very costly, a reduction in the electricity consumption of a refrigerator could generate not only a competitive advantage for the manufacturer, but also in terms of the savings in overall energy use and a reduction of the total environmental impact of the product. Several alternatives to improve the thermal-energy behavior found in refrigerators have been reported in the scientific literature [4]. The most common approaches to reduce the energy consumption of household refrigerators to date include the use of optimized insulation [5], energy efficient compressors and enhanced heat transfer in heat exchangers [6].

In the area of thermal insulation, studies that incorporate vacuum insulating panels in expansion foaming have been carried out [7] and also studies on geo-polymerized perlite foams [8]. It is well known that blowing agents are most widely used in domestic refrigeration [9]. The rigid polyurethane as thermal insulation was being developed but manufacturers first abandoned the use of R11 (CFC) as blowing agent, to make way for R141b (HCFC) and the next generation R245fa (HFC) and cyclopentane (HC). However, the use of these blowing agents still has drawbacks, both environmental and energy, and initial investment in changing production lines, as well as the lack of a safe operation for the case of the cyclopentane. Recently, a new molecule, Forane1233zd was announced as blowing agent and of low global warming potential (GWP) by the company Arkema [10]. Evaluations by the company cast that this new blowing agent provides better energy performance compared with conventional agents. Thermal insulation is very important in the cold generation industry, which is looking for new and better materials for use as insulation, among which are compounds or composites.

The aim of this paper is to present the simple application of a novel polymer-ceramic composite as thermal insulation in a household refrigerator of small capacity. For this purpose, the feasibility of the composite is evaluated in an experimental facility from both the thermal and energetic points of view. It is concluded that the composite acts as insulation under the experimental conditions and development of this material. Thus it enables a promising proposal in the field of refrigeration.

## 2. Polymer-ceramic composite

Composite materials are not a human invention, many materials found in nature are composites, and wood is a typical example of what is constituted by cellulose fibers wrapped in a matrix of natural resins. The fibers provide the resistance needed, in some directions, to the plant. A composite material is a combination of two or more different materials that do not chemically react. The materials that constitute it maintain their properties in the composite, even though the combination produces more than the sum of its parts. One of the materials that constitute the composite is in the continuous phase and is called the matrix. The other principal constituent is a backbone in the form of fibers or particles that, in general, are added to the matrix in order to improve its properties. The backbone forms a discontinuous

phase that is uniformly dispersed across the matrix.

Currently, composite materials have been put to use in diverse applications, due to the ease of processing, good mechanical and thermal properties, favorable environmental aspects and, savings in production costs, besides presenting an alternative for energy saving [11-13]. The field of application of composite materials is wide, for example, for engineering applications at low temperatures there has been interest in using poly-ceramic composites. Not only because it provides a good isolation from heat and sound, but also because it is environmentally clean in its production and its application [14].

In this way, this paper presents the thermal and energetic accountability of a composite material developed in the Materials Lab of the Engineering Division of the University of Guanajuato, Mexico, as an alternative thermal isolation element in refrigeration systems [15].

### 2.1. Manufacturing the composite

The composite is made of perlite fibers in the shape of strands supported in a matrix of thermo-stable resin, which consists of diglycidyl ether of bisphenol-A (DGEBA) and diethylentriamine (DETA). The composite material was manufactured for the purpose of evaluating its application as a thermal insulator in household refrigeration. The method and process involved in manufacturing the composite is based on the work of a master's thesis developed in the Materials Laboratory of the Engineering Division in the University of Guanajuato [16].

#### 2.1.1. Preparation for the perlite pyro-expanded

The pyro-expanded perlite is named like this because it is a mineral with water trapped in its structure, by subjecting it to higher temperatures the water vaporizes, which causes the material to expand and thereby reduce its density without affecting its thermal conductivity. As such, it is used to make inorganic foam materials for thermal isolation due to its excellent thermo-physical properties; additionally it is inflammable and is therefore safe for human use, as well as in the environment. Commercially, the normal temperature range that this isolating material can withstand ranges from 1 K to 1033 K.

Pyro-expanded perlite is used as a primer material for the synthesis of the composite, this is due to the idea of fabricating an isolating material with a density apparently similar to conventional insulators applied to household refrigeration. This is not possible using non-expanded perlite as its density is approximately 1100 kg/m<sup>3</sup>, whilst the density of pyro-expanded perlite is between 30 and 150 kg/m<sup>3</sup> [8]. The preparation of the fibers is the most important part of the fabrication of the composite as its physical, mechanical and thermal properties are strongly determined by the backbone fibers.

The initial material of pyro-expanded perlite presents itself in the shape of small amorphous rocks, which are ground and sieved until it reaches a fine consistency, similar to 150  $\mu\text{m}$  talc. The fibres are made using this powder through thermal treatment in mullite moulds, which have



Figure 1. Panel of manufactured composite.  
Source: The authors.

good mechanical resistance, low density, inflammable, exhibit dimensional stability and are also good thermal and electrical isolators. The fibres formed through this process have different lengths due to the limited controls on manufacture. Epoxy resins are used in a great number of cryogenic applications due to their resistance to low temperatures and they give the composite excellent mechanical properties. The epoxy resin used as a matrix in the composite was prepared following instructions from the manufacturer. The epoxy (ID 4D114) and the hardener (ID NC566) were obtained from the EPOXEMEX Company. After obtaining the fibers and having prepared the matrix, we progressed to the formation of the panel of the composite through a geometric arrangement of the fibers embedded in the matrix, whose final structure is shown in Fig. 1.

Among the advantages offered by this material, and based upon its particular application in this research, it is its low thermal conductivity of about 0.025 W/m K. Besides, the composite material has a good mechanical resistance and tenacity at low temperatures. More information on the properties and the manufacture of the composite may be found in [15]. As such, it is of great importance to highlight the environmentally favorable aspects of the composite as compared to conventional thermal insulating foams, the composite does not use hydrocarbons, clorofluorocarbons, hydrofluorocarbons nor hidrochlorofluorocarbons; but it uses a naturally occurring mineral, pyro-expanded perlite. This means that its manufacture avoids large emissions of pollutants that cause global warming or wastage of the ozone layer.

### 3. Experimental refrigerator

Experimental tests were performed for a commercial minibar (see Fig. 2) with a net capacity of 0.046 m<sup>3</sup> (1.6 ft<sup>3</sup>). The external dimensions of the experimental refrigerator are 0.44 m x 0.5 m x 0.47 m (width x depth x height) and the wall thickness is approximately 0.037 m of polyurethane with a mixture of R141b/R22 as blowing agent, its thermal conductivity is between a range of 0.0175 a 0.024 W/m K. A refrigerator with a small storage capacity was chosen for practical reasons as less composite needs to be produced in order to replace the original insulation.

The experimental refrigerator has one compartment divided by a wire shelf, the door also has shelves protected by wire and there is also an exposed evaporator type roll bond, which works by natural convection and comprises the area of a small freezer. The minibar is based on compression vapor technology.

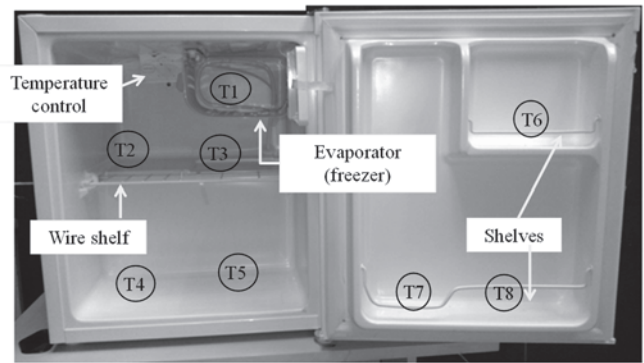


Figure 2. Experimental refrigerator (minibar).  
Source: The authors.

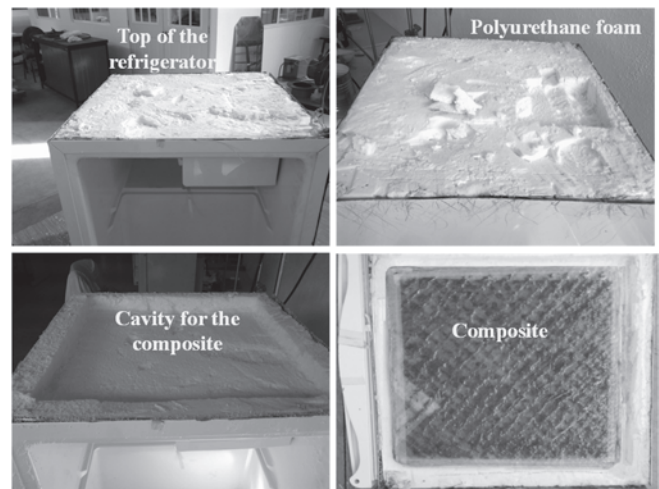


Figure 3. Installation of the composite.  
Source: The authors.

#### 3.1. Installation of the composite

In order to evaluate the composite developed, we installed the material at the top of the refrigerator. This location was chosen in order to replace the conventional insulation the purpose of which is to avoid damaging the hot pipelines that pass through the lateral walls of this kind of refrigerator. In addition, the placement of the panel was analyzed according to the location of the evaporator; a zone where the lower temperatures are present and it may be the area of higher energy transfer within the enclosed environment. Fig. 3 shows the implementation of the panel composite.

In order to adequately align the panel, several holes were partially filled with conventional foam in order to exert pressure whilst installing the top sheet of the refrigerator.

#### 3.2. Instrumentation and measurements

The refrigerator under study has attached sensors in order to measure parameters such as temperature and energy consumption. The tests were carried out at position 4 of the temperature dial, which are the refrigerator factory settings. The temperature sensors are calibrated in our laboratory using certified references, obtaining an uncertainty of  $\pm 0.3$  K,

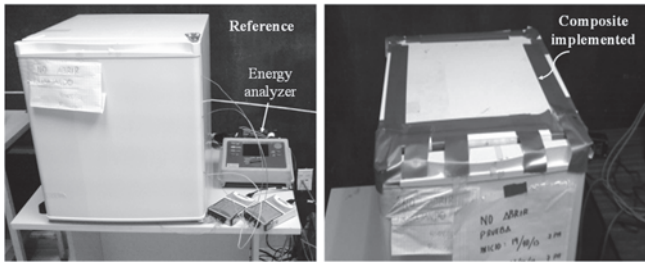


Figure 4. Experimental test bench.  
Source: The authors.

while the energy consumption is measured using an energy analyzer fluke with a certified accuracy within  $\pm 0.7\%$ . In order to measure the temperature in the compartment, seven thermocouples were placed inside containers of  $0.245\text{ l}$  ( $0.000245\text{ m}^3$ ) with a mixture at 50% in volume of water and glycol. The containers were distributed on the wire shelf and the door shelves (see Fig. 2). The temperature measurement in the freezer was obtained with one thermocouple placed inside a wood block in order to avoid density and volume changes during the test.

Several tests were performed within approximately 24 hours, including the transitory performance during the startup and halt of the compressor. The refrigerator operated at a room temperature of  $295\text{ K} \pm 1\text{ K}$  and with a relative humidity of  $70 \pm 5\%$ . The signals generated by the temperature measurement device were stored in a data acquisition system based on a PC with LabVIEW SignalExpress® software. The energy analyzer is configured for data storage in a lapse of 24 hours each 40 seconds, and both temperature and energy measurements are taken in parallel form.

#### 4. Experimental results

The experimental analysis involves comparing the thermal and energy conditions of the minibar in its reference state (using refrigerator Factory settings) and with the modification (implementation of composite). The refrigerator in both tests is evaluated with the door shut and without load, i.e. empty, only with thermocouples inside for measurements. The tests are started at approximately the same external conditions of temperature and humidity. For this, tests were performed for a duration of approximately 24 hours in both cases. Fig. 4 shows the experimental test bench.

##### 4.1. Thermal analysis

In Figs. 5 and 6, the thermal profile of the reference refrigerator and the refrigerator with the composite implementation are shown respectively. Fig. 5 clearly shows that the lower temperature corresponds to the small freezer compartment. It is reasonable that the stability in this region is reached in less time, whereas practically all of the measurements are above  $0^\circ\text{C}$ . Also, it may be noted that the steady thermal behavior of this refrigerator of low capacity begins within approximately 10 hours of starting the test.

Regarding the thermal behavior using the composite material, Fig. 6 shows the thermal profile. Entrance similarity

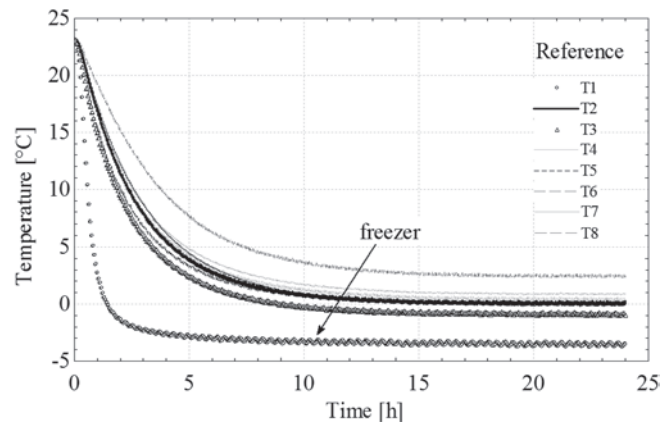


Figure 5. Thermal profile in the reference refrigerator.  
Source: The authors.

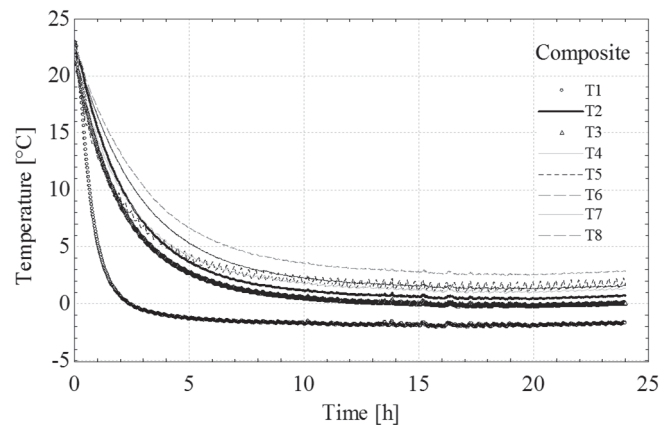


Figure 6. Thermal profile with the implementation of the composite.  
Source: The authors.

is observed in the temperature trends, it is observed that the measurement of some points shows slight increases in the temperature of the refrigerator using the composite. The most notable case is the thermocouple located in the freezer. The slight thermal variations present in the refrigerator using the composite are due simply to the structure of the material affecting the behavior of the energy transfer by natural convection in the cooling compartment.

A lack of thermal cycles is also observed in both thermal performances (Fig. 5 and 6). First, this may be due to the type of calibration of the unit in relation to the times of startup and halt of the compressor, all of this taking into account that the refrigerator was evaluated with the door shut; second, because of the size of the refrigerator, which represents a much smaller space and little disturbance by external conditions. Here is highlighted the proper application of the composite which causes a similar thermal behavior in respect to the reference refrigerator. Continuing with the thermal comparison, in Fig. 7 the average temperature profile is compared between the reference refrigerator and the one with the composite.

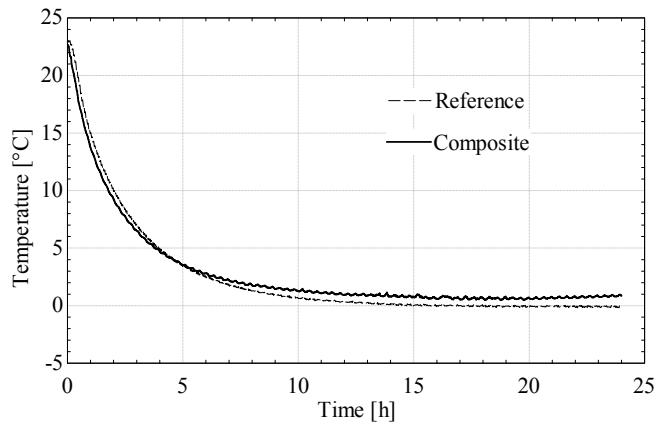


Figure 7. Thermal profile average in the refrigerator.  
Source: The authors.

Analyzing the range of stabilization, it may be concluded that a difference of 1°C exists between the unit working with the composite and the unit with the conventional insulator. Upon evaluation of the practical application of the composite as a thermal isolator, we may say that it takes an acceptable temperature within the factory settings at position 4 (around 3°C).

According to the thermal profiles, it is possible to establish that during the experimental use of the composite, the internal temperature of the equipment is slightly above the reference state. However, it is possible to maintain a stable thermal profile that guarantees the correct functioning of the refrigerator. With the application of the composite it is concluded that the refrigerator is functioning within an adequate thermal range, which leads us to presume that this material may be put to good use in this kind of system.

#### 4.2. Energy analysis

This section compares the energy consumption of both kinds of refrigerator. Fig. 8 shows the initial operation cycles, whose behavior is constant in the successive cycles during the 24 hour test time. It was observed that the first functioning cycle (start-up) lasts longer; this is due to the initial temperature difference between the refrigerator and its environment.

For this reason, the form of the figure has a larger start-up cycle for the reference refrigerator, which is due to the test starting at a slightly higher temperature, which is why the compressor works harder in order to reach a certain calibration temperature. Additionally, in the figure, it may be observed that for the previous functioning cycles the operation time (with the compressor turned on) is similar for both functioning cases.

The most interesting energetic behavior results are indicated in Table 1. For the comparison between the two functioning states, the operating difference radiates in the time it takes to turn off the compressor, which presented a difference of 0.032 hours. When the insulating composite is installed in the refrigerator, the compressor operates for 0.088 hours and rests for a total of 0.244 hours, meaning that a complete cycle occurs in 0.332 hours.

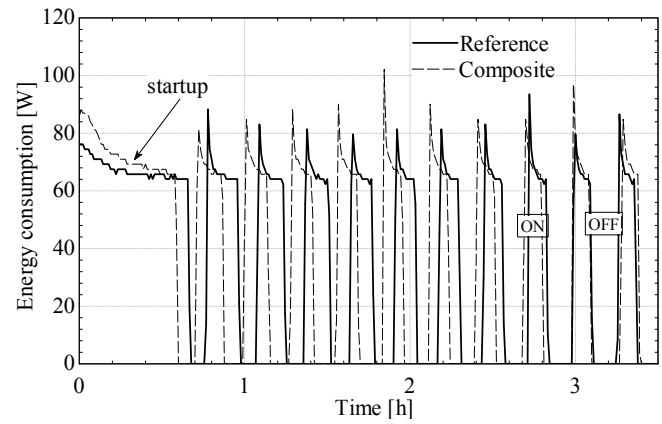


Figure 8. Energetic behavior in the refrigerator.  
Source: The authors.

Table 1.  
Main results of the energetic behavior.

| Parameter                                           | Refrigerator (reference) | Refrigerator (composite) |
|-----------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Maximum power [W]                                   | 103.909                  | 107.373                  |
| Working cycle steady state [h]                      | 0.300                    | 0.332                    |
| On-time [h]                                         | 0.088                    | 0.088                    |
| Off-time [h]                                        | 0.212                    | 0.244                    |
| Duration of initial operation of the compressor [h] | 0.666                    | 0.588                    |
| Active energy consumed 24 h [Wh]                    | 530.160                  | 526.693                  |

Source: The authors.

Once the characteristic functioning times have been analyzed, it is determined that the reference refrigerator under stable functioning conditions has a higher number of operating cycles during a set period. For example, from the analysis of the energy consumption in the last four hours of operation of each one of the tests, it may be concluded that the refrigerator with the composite saves approximately 1.5% more energy than the reference refrigerator. This is a good indication that, at least, the composite as insulation has adequate energy performance; all of this under the test conditions performed in our laboratory. The authors consider that more significant energy savings can be achieved through the improvement in the development of the material. Moreover, this energy comparative represents the composite application in one of the most critical parts of the minibar because of the closeness to the evaporator and what it represents in terms of the temperature difference in this space and its surroundings.

It should be highlighted that the composite developed has been exposed to high service requirements against conventional cellular foam, which is the most common insulator used in household refrigerators. Also, the composite adheres to the imperfections generated during the (experimental) manufacturing process, such as: the quantity of material used, uniformity of the fiber, porosity of the material, adherence between layers, etc. as well as adequately fixing the material to the appropriate space. Despite all this, the pyro-expanded composite complies as a thermal isolating material.

On the other hand, one of the possible doubts generated in the development of the material, is its manufacture.

According to the development of the material presented in this work, it seems that it was a pretty lengthy and costly process. However, it should not be forgotten that this process was planned and developed only at the laboratory level, using small specimens and molds, additionally; a limiting factor was the manufacturing capacity of the pyro-expanded perlite fibers. We consider that the same process, but at an industrial or mass scale level may exhibit greater ease, and thermal, energetic and economic benefits, without omitting the environmentally favorable characteristics. Within the parameters that must be taken into account to improve the composite and to present better thermal and energy performances are: the shape, size, distribution, quantity, material type and its particular properties in the dispersed phase, which in this case is ceramic. Moreover, the matrix is providing, in its chemical composition, properties that are the most homogeneous as possible and in the amounts presented in this composite. In the case of this work and in the traditional way, other geometry could be tested for the stacking of the disperse phase.

## 5. Conclusions

This article briefly presented the development in the lab and the principle characteristics of a new composite material, proposed as a thermal insulator. The emphasis of the study consisted in the evaluation of the feasibility of the new material implemented in the upper wall of a refrigerator with a small capacity (minibar). The research focused on a comparison of the thermal and energy performance of the fridge at factory settings and the fridge with the composite installed. It is concluded that the refrigerator with the composite exhibits an average increase of 1°C as compared to the reference refrigerator (using factory settings). On the energy side and for a stable period in the last four operation hours of the refrigerator, it was found that the refrigerator with the implemented composite saves approximately 1.5% more energy than the reference refrigerator with its factory settings.

More generally, the new material proposed in this paper as an insulator may be an interesting alternative that has room for improvement. Although the composite was made by hand in this case, it presented acceptable results, making it an option in the field of domestic refrigeration.

## Acknowledgments

The authors wish to thank the Directorate for Research Support and Postgraduate Programs at the University of Guanajuato for their support in the translation and editing of the English-language version of this article

## References

- [1] Seong, S.J. and Soo, H.J., Experimental study of heat transfer characteristics for a refrigerator by using reverse heat loss method. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38 (5), pp. 572-576, 2011. DOI: 10.1016/J.icheatmasstransfer.2011.02.007
- [2] Centro Nacional de Población y Vivienda, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), México, 2010.
- [3] Miceli, R., Energy management and smart grids. *Energies*, 6 (4), pp. 2262-2290, 2013. DOI: 10.3390/en6042262
- [4] Bansal, P., Vineyard, E. and Abdelaziz, O., Advances in household appliances - A review. *Applied Thermal Engineering*, 31 (17-18), pp. 3748-3760, 2011. DOI: 10.1016/J.Applthermaleng.2011.07.023

- [5] Yoon, W.J., Seo, K. and Kim, Y., Development of an optimization strategy for insulation thickness of a domestic refrigerator-freezer. *International Journal of Refrigeration*, 36 (3), pp. 1162-1172, 2013. DOI: 10.1016/J.Ijrefrig.2012.11.013
- [6] Marques, A.C., Davies, G.F., Evans, J.A., Maidment, G.G. and Wood, I.D., Theoretical modelling and experimental investigation of a thermal energy storage refrigerator. *Energy*, 55 (15), pp. 457-465, 2013. DOI: 10.1016/j.energy.2013.03.091
- [7] Koebel, M., Rigacci, A. and Achard, P., Aerogel-based thermal superinsulation: An overview. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 63, pp. 315-339, 2012. DOI: 10.1007/s10971-012-2792-9
- [8] Vaou, V. and Panias, D., Thermal insulating foamy geopolymers from perlite. *Minerals Engineering*, 23 (14), pp. 1146-1151, 2010. DOI: 10.1016/j.mineng.2010.07.015
- [9] Johnson, R.W., The effect of blowing agent choice on energy use and global warming impact of a refrigerator. *International Journal of Refrigeration*, 27 (7), pp. 794-799, 2004. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2004.07.005
- [10] Arkema reveals new low-GWP blowing agent for polyurethane foams. *Additives for Polymers*, 2013 (11), pp. 3-3, 2013. DOI:10.1016/S0306-3747(13)70169-6
- [11] Yamsaengsung, W. and Sombatsompom, N., Effect of chemical blowing agent on cell structure and mechanical properties of EPDM foam, and peel strength and thermal conductivity of wood/NR composite-EPDM foam laminates. *Composites Part B: Engineering*, 40 (7), pp. 594-600, 2009. DOI:10.1016/j.compositesb.2009.04.003
- [12] Rios-Soberanis, C.R., Cruz-Estrada, R.H., Rodríguez-Laviada, J. and Pérez-Pacheco, E., Study of mechanical behavior of textil reinforced composite materials. *DYNA*, 79 (176), pp. 115-123, 2012.
- [13] Gutiérrez, J., Cadena, C. and Bula, A., Thermal insulation produced from rice husk agglomerated using starch produced by *saccharomyces cerevisiae*. *DYNA*, 81 (184), pp. 138-143, 2014.
- [14] Mallick, P.K., *Composites Engineering Handbook*, in *Composites Engineering Handbook (Materials Engineering Series)*. New York: Marcel Dekker, Inc., 1997.
- [15] Gámez-Arredondo, S.A., Application of polymer/ceramic composite for improvement thermal and energetic of a domestic refrigerator, MSc. Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Guanajuato, México, 2013.
- [16] Enriquez-Gutiérrez, V.M., Design of a composite of perlite piro-expanded/epoxy for thermal insulation in cryogenic process, MSc. Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Guanajuato, México, 2011.

**J.M. Belman-Flores**, obtained the PhD degree from University Jaume I, Spain in 2008. He is currently a full-time professor in the engineering division at the University of Guanajuato, Mexico. Over 70 papers have been published in National and International Congress/Journals. His research interests includes: refrigeration, thermal systems, energy saving and modeling systems.

**B. González-Rolón**, received Dra. in Science of Materials from UNAM, Mexico in 1997. She is a full-time professor in the materials science in the Department of Mechanical Engineering, at University of Guanajuato, Mexico. Teaching: 228 Graduate courses, 20 Master's courses, 9 Doctoral courses. Supervised theses: 18 Graduate, 8 Master's degrees, and 2 Doctoral degrees. Theses currently being supervised: 3 Graduate degrees, 3 Master's degrees, and 2 doctoral degrees. Keynote speech at Mejiro University in Nagoya, Japan, entitled "Present status of insulating materials in Mexico". September 2000, Nagoya, Japan.

**J. Serrano-Arellano**, received his Dr. degree in Mechanical Engineering in 2013 in the National Center for Research and Technological Development (CENIDET). Currently he is performing postdoctoral studies at the University of Guanajuato, Mexico. His areas of interest are heat transfer, mass transfer, ventilation systems, and renewable energy among others.

**S. Gámez-Arredondo**, received his MSc. degree in Mechanical Engineering in 2013 in the University of Guanajuato, Mexico. Currently he is working at the InverCost Group, Mexico. His areas of interest are thermal and power systems.

## Shear strength of landfills

Eimar Andrés Sandoval-Vallejo <sup>a</sup>, Andrés Ramirez-Tascón <sup>b</sup> & Diego Cuarán <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Grupo G-7, Universidad del Valle, Cali, Colombia. [eimar.sandoval@correounivalle.edu.co](mailto:eimar.sandoval@correounivalle.edu.co)

<sup>b</sup> Universidad del Valle, Cali, Colombia, [amarata@hotmail.com](mailto:amarata@hotmail.com)

<sup>c</sup> Universidad del Valle, Cali, Colombia, [cuaran86@hotmail.com](mailto:cuaran86@hotmail.com)

Received: October 6<sup>th</sup>, 2014. Received in revised form: July 29<sup>th</sup>, 2015. Accepted: August 19<sup>th</sup>, 2015.

### Abstract

Landfills are engineering structures formed with a specific material, whose shear strength properties can be determined in a similar way, as it is done for a geotechnical material. This paper presents results from an experimental program carried out to obtain the strength parameters for Presidente landfill at Valle del Cauca (Colombia). The experimental program included unconsolidated undrained direct shear tests (UU) performed on laboratory reconstituted samples. Variation of the internal friction angle and cohesion, as a function of the specific weight, depth and decomposition time of the landfill was evaluated. Results were also compared to international values used for design purposes. Results showed a remarkable influence of the waste decomposition time in the shear strength. Some relationship with the depth was also found. Obtained strength parameters are within international ranges recommended for design purposes.

**Keywords:** landfills; shear strength; direct shear; undrained tests; internal friction angle; cohesion; decomposition time.

## Resistencia al esfuerzo cortante en rellenos sanitarios

### Resumen

Los rellenos sanitarios son obras ingenieriles conformadas con un material específico, cuyas propiedades de resistencia al corte pueden determinarse de manera similar a la de un material geotécnico. Este artículo presenta resultados de un programa experimental realizado con el fin de obtener los parámetros de resistencia al corte del relleno sanitario Presidente en el Valle del Cauca (Colombia). El programa experimental involucró ensayos de corte directo no consolidado no drenado (UU) sobre muestras reconstituidas en laboratorio. La variación del ángulo de fricción interna y de la cohesión, como una función del peso específico, profundidad, y tiempo de descomposición del relleno fue evaluada. También se compararon los resultados con valores internacionales usados para diseño. Los resultados mostraron una marcada influencia del tiempo de descomposición en la resistencia al corte. También se encontró cierta dependencia con la profundidad. Los parámetros de resistencia obtenidos se encuentran dentro de rangos internacionales recomendados para diseño.

**Palabras clave:** rellenos sanitarios; resistencia al esfuerzo cortante; corte directo; ensayos no drenados; ángulo de fricción interna; cohesión; tiempo de descomposición.

### 1. Introducción

Los rellenos sanitarios son obras ingenieriles con un material de relleno específico, cuya caracterización física, incluida la determinación de sus propiedades de resistencia al corte, ángulo de fricción interna ( $\Phi$ ) y cohesión ( $C$ ), puede realizarse de manera similar a la de un material geotécnico. Las propiedades de resistencia del relleno influyen en las etapas de diseño, construcción, operación, cierre y rehabilitación del mismo.

A pesar de que la estabilidad de los taludes en rellenos

sanitarios no es solamente definida por la resistencia al corte del material de relleno, y que tales diseños suelen ser conservadores, con bajas pendientes de los taludes; el uso de valores inapropiados de la resistencia al corte podría desencadenar en inestabilidades. Algunos sistemas de drenajes y tuberías dentro del relleno, también podrían verse afectados debido al uso inadecuado de valores de resistencia al corte del material.

Los lixiviados, producidos por el efecto de la lluvia sobre los componentes del relleno, aumentan la posibilidad de que se presenten inestabilidades, debido a que saturan total o

parcialmente el relleno. Aunque recientemente se han planteado métodos para la remoción de nitrógeno de los lixiviados [1], estos procedimientos son usados para la descontaminación, y no para la evacuación de los lixiviados. El uso de sistemas de drenaje puede ayudar, pero el proceso de formación de los lixiviados, mediante el contacto de la lluvia con los residuos sólidos, hace que al menos parte de la altura del relleno, se encuentre saturada en algún periodo de tiempo.

Varias inestabilidades en rellenos sanitarios han sido reportadas en la literatura. Por ejemplo, Kettleman en Estados Unidos, 1998, [2], Rumpke en Estados Unidos, 1992, [3], Doña Juana en Bogotá, Colombia, 1997, [4], Payatas en Filipinas, 2000, [5], Java en Indonesia, 2010, [6], entre otros. Debido a lo anterior, en las últimas tres décadas se ha dado importancia a la determinación de los parámetros de resistencia al corte de rellenos sanitarios, a partir de ensayos in-situ o de laboratorio, especialmente en países desarrollados. En países en desarrollo, la técnica es más reciente, y comúnmente no se determinan los parámetros de resistencia del sitio, sino que los diseñadores usan como referencia valores de otros lugares, los cuales tienen diferencias en su composición.

Este artículo busca contribuir al estado del arte en este tema, al presentar los parámetros de resistencia al corte de dos celdas de trabajo del relleno sanitario Presidente, ubicado en el municipio de San Pedro, departamento del Valle del Cauca. El programa experimental incluyó ocho ensayos de corte directo, tipo no consolidado no drenado (UU), sobre muestras reconstituidas tamizadas y compactadas en el laboratorio. Se analizan estos parámetros como una función del peso específico, la profundidad y el tiempo de descomposición. Los resultados también se comparan con valores internacionales usados para diseño, y con resultados de otro relleno en Colombia.

## 2. Antecedentes

### 2.1. Origen de los residuos sólidos

Los residuos sólidos pueden clasificarse de acuerdo a su origen, de la siguiente manera [7]:

- Domésticos
- Comerciales
- Institucionales
- Construcción y demolición
- Servicios municipales
- Zonas de planta de tratamiento industrial y agrícola

### 2.2. Composición física de los residuos sólidos

Debido a su composición, los residuos sólidos pueden clasificarse dentro de dos grupos principales:

- Materiales con fracción orgánica: residuos de alimentos, residuos de jardín, podas, papel, cartón, residuos sanitarios, textiles, pañales y madera.
- Materiales inertes: metales, plásticos, residuos especiales, residuos hospitalarios, vidrio, cuero, caucho, entre otros.

Los diferentes componentes individuales que constituyen

los residuos sólidos, suelen expresarse de manera porcentual [7]. La composición de los residuos sólidos varía de región a región y de país a país, por ejemplo países en desarrollo usualmente contienen residuos con mayor cantidad de material biodegradable y menos plástico; mientras que países desarrollados como Alemania, con políticas de reciclaje y pre-tratamiento bien establecidas, tienen residuos con menos contenido de material biodegradable, y una clasificación más uniforme y consistente [8].

### 2.3. Propiedades geotécnicas de los residuos sólidos

Los residuos sólidos son materiales heterogéneos, anisótropos y aleatorios que poseen propiedades mecánicas, biológicas e higroscópicas en continuo cambio. Están conformados por partículas sólidas y espacios vacíos que incluyen gases y lixiviados [9].

Propiedades físicas comúnmente determinadas en materiales geotécnicos, tales como peso específico, gravedad específica, contenido de humedad, distribución granulométrica, permeabilidad, resistencia al esfuerzo cortante, entre otras, pueden también ser evaluadas en los residuos sólidos.

El cambio en la estructura mecánica y biológica del material que conforma los residuos sólidos, sugiere cierta interdependencia entre sus propiedades. Por ejemplo, los parámetros de resistencia al corte pueden variar de acuerdo a modificaciones en el peso específico, la distribución de tamaños, entre otras. Debido a la composición de los rellenos sanitarios, el tiempo de descomposición biológico también puede afectar estos parámetros.

### 2.4. Propiedades biológicas de los residuos sólidos

Para efectos de la investigación presentada en este artículo, la propiedad biológica más importante en los residuos sólidos es la biodegradabilidad. Esta es la propiedad que tienen los componentes orgánicos para convertirse biológicamente en gases y sólidos orgánicos, e inorgánicos relativamente inertes.

La velocidad a la que los diversos componentes de los residuos sólidos pueden ser degradados varía notablemente según su composición y origen. Para fines prácticos, en función de la velocidad de descomposición, los residuos con fracción orgánica se clasifican en residuos de descomposición rápida, media y lenta, como se indica en la Tabla 1. El tiempo de descomposición de los residuos inertes es mayor de 25 años.

Tabla 1.  
Velocidad de descomposición según componentes orgánicos [10]

| Velocidad de descomposición | Componente                                                                 | Tiempo aproximado de descomposición en el relleno (años) |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Rápida                      | Residuos de alimentos<br>residuos de jardín, poda                          | 0 – 1                                                    |
| Media                       | Papel, cartón, cartón para alimentos, papel higiénico, residuos sanitarios | 2                                                        |
| Lenta                       | Textiles, pañales, madera                                                  | 25                                                       |

Fuente: Adaptada de Reddy et al., 2009

### 3. Revisión de literatura

Se realizó una revisión de literatura sobre investigaciones de resistencia al corte en rellenos sanitarios en Colombia y el mundo. Tal información se utilizó para conocer valores típicos de resistencia al esfuerzo cortante de rellenos sanitarios, para tener una idea de la composición de los rellenos en Colombia y el mundo, y para verificar si las dimensiones de la muestra y número de ensayos usados en esta investigación, son adecuados en comparación con la tendencia mundial y el estado del arte en este tema.

La Tabla 2 presenta la composición de algunos rellenos, y la Tabla 3 incluye dimensiones de las muestras, y cantidad de ensayos de corte directo realizados en investigaciones previas. Aunque existen métodos de campo, u otros ensayos de laboratorio para determinar la resistencia al corte en rellenos sanitarios, la Tabla 3 sólo presenta ensayos de corte directo en laboratorio, debido a que fue la metodología empleada en esta investigación, y a que son los más usados en laboratorio por su practicidad, y porque permiten utilizar mayores dimensiones de las muestras. Parámetros típicos de resistencia al corte son discutidos en el Capítulo 6, correspondiente al análisis de resultados.

En la Tabla 2 se evidencia una diferencia importante en el contenido de residuos orgánicos entre los rellenos de Colombia y otros lugares del mundo, específicamente en los residuos de alimentos. Los rellenos colombianos tienen en general mayor contenido de componentes orgánicos, y el relleno sanitario Presidente, objeto de este estudio, presenta el mayor porcentaje de componentes orgánicos, entre todos los rellenos comparados.

Tabla 2.  
Comparación de la composición para diferentes rellenos de Colombia y otros países

| Relleno                    | Guaymaral (11)     | Villavicencio (11) | Doña Juana (9) | Colomba-Guabal (12) | Presidente (*) | Navarro (13) | Orchard-Chicago (USA) (10) | Promedio USA (7) | Brasil (14) |
|----------------------------|--------------------|--------------------|----------------|---------------------|----------------|--------------|----------------------------|------------------|-------------|
| <i>Compon. Orgánico</i>    | Producción total % |                    |                |                     |                |              |                            |                  |             |
| Residuos                   | 32                 | 49                 | 52             | 73                  | 65             | 75           | 7                          | 28               |             |
| Alimento                   |                    |                    |                |                     |                |              |                            |                  |             |
| Papel y cartón             | 16                 | 13                 | 18             | 7                   | 22             | 6            | 24                         | 40               |             |
| Madera                     | 6                  | 3                  | 3              | 1                   | 0              | 2            | 12                         | 2                |             |
| Textiles                   | 5                  | 2                  | 4              | 1                   | 3              | 1            | 8                          | 2                |             |
| Total orgánicos            | 59                 | 67                 | 77             | 82                  | 90             | 84           | 51                         | 72               | 55          |
| <i>Compon. No Orgánico</i> | Producción total % |                    |                |                     |                |              |                            |                  |             |
| Cuero                      | -                  | -                  | 2              | 8                   | 1              | 7            | -                          | 1                |             |
| Plástico                   | 11                 | 5                  | 13             | 1                   | 4              | 2            | 1                          | 7                |             |
| Metales                    | 7                  | 7                  | 2              | 1                   | 2              | 1            | 5                          | 9                |             |
| Otros                      | 9                  | 9                  | 1              | 7                   | 2              | 5            | 30                         | 3                |             |
| Vidrio                     | 14                 | 12                 | 5              | 1                   | 1              | 1            | 4                          | 8                |             |
| Total no orgánicos         | 41                 | 33                 | 23             | 18                  | 10             | 16           | 49                         | 28               | 45          |

\* M. Arango (Comunicación personal, Agosto de 2012)

Fuente: Los autores

Tabla 3.  
Dimensiones de las muestras utilizadas en investigaciones previas con ensayos de corte directo [15]

| Fuente                                 | Origen de los residuos | Dímetro o lado mayor de la caja de corte (cm) | Tamaño máximo de partícula (cm) |
|----------------------------------------|------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------|
| Landva y Clark (1990) [16]             | Canadá                 | 43                                            | -                               |
| Richardson y Reynolds (1991) [17]      | Central Maine          | 122                                           | -                               |
| Houston et al. (1995) [18]             | Arizona                | 122                                           | -                               |
| Edinciller et al. (1996) [19]          | Wisconsin              | 30                                            | 5                               |
| Kavasanjian (1999) [20]                | California             | 46                                            | 10                              |
| Mazzucato et al. (1999) [21]           | Italia                 | 80                                            | -                               |
| Caicedo et al. (2002) [22]             | Colombia               | 90                                            | -                               |
| Mahler and De Lamare Netto (2003) [24] | Brasil                 | 40                                            | 2                               |
| Zekkos (2009) [15]                     | California             | 30                                            | 7.6                             |
| Esta investigación                     |                        | 30                                            | 6.5                             |

Fuente: Adaptada de Zekkos et al., 2010

En la Tabla 3 se puede observar que 30 cm de lado o diámetro, es la menor dimensión que se ha usado en investigaciones previas con ensayos de corte directo, por lo cual esta dimensión fue adoptada en esta investigación.

### 4. Metodología y equipo

#### 4.1. Dispositivo de corte directo para residuos sólidos

Se construyó un dispositivo de corte para analizar muestras cuadradas de 30 cm de lado y 13 cm de altura. El dispositivo fue creado para realizar ensayos rápidos tipo no consolidado no drenado (UU), aunque se planean algunos ajustes en una segunda etapa, para realizar ensayos lentos tipo consolidado drenado (CD). El equipo permite realizar



Figura 1. Esquema del dispositivo de corte diseñado  
Fuente: Los autores



Figura 2. Fotografía del equipo de corte construido  
Fuente: Los autores

ensayos con esfuerzos normales hasta de 150 kPa. Las presiones normales son generadas por medio de una prensa hidráulica y controladas con un anillo de carga, la carga cortante es determinada mediante un anillo de carga, y los desplazamientos son controlados con el tiempo y la velocidad del motor, previamente conocida. La Fig. 1 presenta un esquema del diseño del dispositivo de corte para esta investigación, y la Fig. 2 muestra el equipo construido.

#### 4.2. Validación de la metodología y equipo

Con el fin de verificar el correcto funcionamiento del dispositivo construido, se realizó un ensayo de corte directo tipo CD sobre una arena limpia extraída del municipio del Tambo Cauca, de acuerdo a la norma ASTM D3080-04 [24].

El ensayo fue ejecutado bajo condiciones de densidad relativa y esfuerzos normales similares en dos dispositivos: i) en un equipo de corte directo estandarizado para suelos, con muestras cuadradas de 2" de lado; ii) en la máquina de corte directo diseñada en esta investigación.

La Fig. 3 y la Tabla 4 resumen los resultados, los cuales tuvieron variaciones del orden del 2% en el parámetro de resistencia al corte obtenido (ángulo de fricción interna,  $\Phi'$ ). Esta diferencia es bastante aceptable para investigaciones experimentales mediante ensayos de laboratorio. Los resultados obtenidos se reportan en parámetros efectivos, debido a que las muestras se encontraban secas antes de realizar los ensayos.

### 5. Fase experimental

#### 5.1. Trabajo de campo

##### 5.1.1. Sitio de muestreo

Los resultados presentados en esta investigación corresponden a muestras extraídas en dos celdas de trabajo del relleno sanitario Presidente en el Valle del Cauca. A pesar de que las celdas en el relleno tenían profundidades de 7 y 32 m respectivamente, las muestras fueron tomadas a sólo 3 y 5

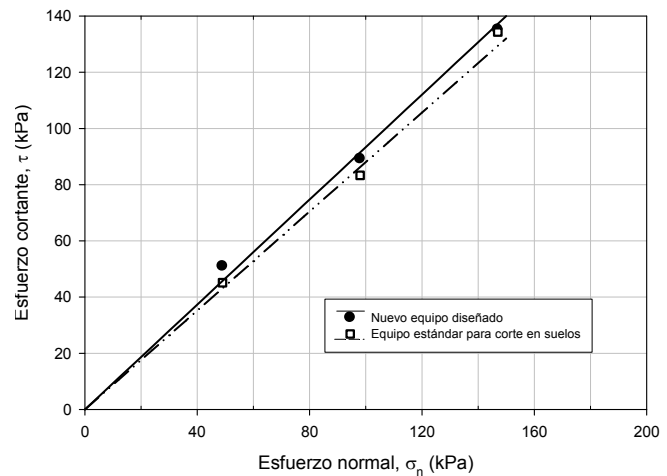


Figura 3. Envolventes de falla para validación de metodología y equipo  
Fuente: Los autores

Tabla 4.

Parámetros de resistencia al corte para validación de metodología y equipo

| Prueba          | $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> ) | $\sigma_n$ (kPa) | $\tau$ (kPa) | Parámetros<br>$\Phi'$ $C'$ |   |
|-----------------|-------------------------------|------------------|--------------|----------------------------|---|
| Nuevo equipo    | 1.47                          | 49               | 51.0         | 42.8                       | 0 |
|                 | 1.47                          | 98               | 89.2         |                            |   |
|                 | 1.47                          | 147              | 135.2        |                            |   |
| Equipo estándar | 1.47                          | 49               | 45.1         | 41.9                       | 0 |
|                 | 1.47                          | 98               | 83.3         |                            |   |
|                 | 1.47                          | 147              | 134.3        |                            |   |

Fuente: Los autores

m de profundidad, para evitar inestabilidades de los rellenos, debido al proceso de muestreo a cielo abierto.

El nivel promedio de lixiviados en las celdas en el momento de la toma de muestras era de 7 m, por consiguiente los residuos sólidos no se encontraban saturados, y se consideró que no había, o era despreciable, la generación de excesos de presión de poros durante la etapa de corte. Debido a lo anterior, se realizaron ensayos de corte directo tipo UU.

La celda de trabajo N° 1 contenía residuos con un tiempo de descomposición biológica de 8 meses, mientras que el tiempo de descomposición de los residuos de la celda N° 2 era de 5 años.

##### 5.1.2. Pesos unitarios

Se determinaron los pesos unitarios en el campo por medio de calicatas. Las calicatas consisten en realizar perforaciones, en este caso de 0.50 x 0.50 x 0.50 m, a las cuales se les determina el volumen forrando la perforación con plástico muy delgado y llenándola con agua. [11]. El promedio de los pesos unitarios obtenidos fue de 6 y 13 kN/m<sup>3</sup>, para las muestras con edades de 8 y 60 meses respectivamente.

##### 5.1.3. Toma de muestras alteradas

En cada celda de trabajo se tomaron dos muestras alteradas a 3 m de profundidad y dos a 5 m de profundidad,

para un total de ocho muestras en todo el relleno. Las muestras alteradas fueron obtenidas a cielo abierto por medio de retroexcavadora, y se depositaron en una superficie sobre plástico de alta densidad, para evitar la contaminación por la vegetación presente en las celdas de trabajo. Posteriormente, el material se tamizó en una malla de abertura de 6,5 cm, correspondiente al tamaño máximo de la muestra. Las muestras de material pasante de dicho tamiz fueron transportadas al centro de acopio de la Universidad del Valle.

## 5.2. Trabajo de laboratorio

### 5.2.1. Distribución de tamaño de las muestras

Las muestras tomadas en cada celda de trabajo se depositaron sobre un solado de limpieza, para evitar el contacto con agentes meteorológicos como lluvia o sol, al igual que la contaminación con residuos de edades y profundidades diferentes.

Para la investigación, se construyeron tres tamices con el fin de estimar a groso modo la distribución granulométrica de las muestras. El tamiz 1, que define el tamaño máximo, tuvo una abertura equivalente a la mitad de la altura de la caja de corte directo, (6.5 cm). El tamiz 2 tuvo una abertura igual al 75% del tamaño máximo, (4.8 cm). El tamiz 3 tuvo una abertura equivalente al 50 % del tamaño máximo, (3.25 cm). La Tabla 5 y la Fig. 4 muestran la distribución de tamaño de las muestras.

Tabla 5.  
Distribución granulométrica de las muestras

| # | Edad<br>(Meses) | Profundidad<br>(m) | Rango tamaño (cm) |          |        |
|---|-----------------|--------------------|-------------------|----------|--------|
|   |                 |                    | 6.5–4.8           | 4.8–3.25 | < 3.25 |
| 1 | 8               | 3                  | 17                | 40       | 43     |
| 2 | 8               | 3                  | 24                | 9        | 67     |
| 3 | 8               | 5                  | 64                | 13       | 23     |
| 4 | 8               | 5                  | 45                | 4        | 51     |
| 5 | 60              | 3                  | 3                 | 19       | 78     |
| 6 | 60              | 3                  | 5                 | 15       | 80     |
| 7 | 60              | 5                  | 36                | 19       | 45     |
| 8 | 60              | 5                  | 19                | 9        | 72     |

Fuente: Los autores

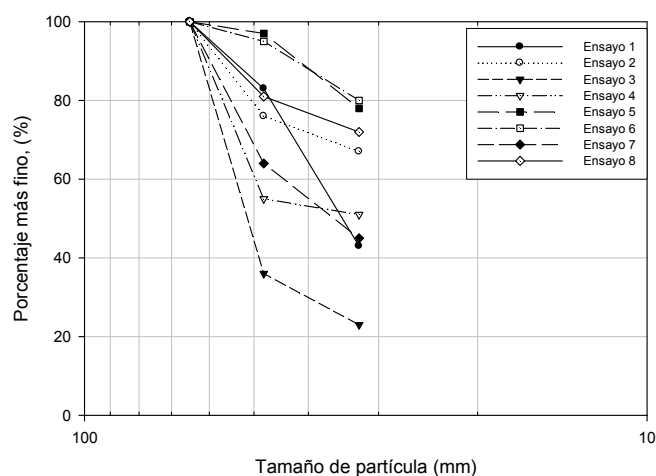


Figura 4. Distribución granulométrica de las muestras  
Fuente: Los autores

Tabla 6.  
Características de los ensayos para las envolventes de falla

| Edad<br>(meses) | Profundidad<br>(m) | $\gamma_w$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | Edad<br>(meses) | Profundidad<br>(m) | $\gamma_w$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) |
|-----------------|--------------------|------------------------------------|-----------------|--------------------|------------------------------------|
| 8               | 3                  | 8                                  | 60              | 3                  | 8                                  |
|                 | 3                  | 14                                 |                 | 3                  | 14                                 |
|                 | 5                  | 8                                  |                 | 5                  | 8                                  |
|                 | 5                  | 14                                 |                 | 5                  | 14                                 |

Fuente: Los autores

Como es de esperarse, debido a la heterogeneidad de los residuos sólidos, se encontraron diferencias considerables en la distribución granulométrica de las muestras, hasta de 61, 36 y 37% en los tres rangos de tamaño analizados. Debido a lo anterior, y siguiendo lo recomendado por [25], se prepararon las muestras para los ensayos, de tal manera que todas tuvieran la misma distribución granulométrica, la cual consistió en tres partes iguales para cada rango de tamaño.

### 5.2.2. Características de las muestras para los ensayos

Las características de las ocho envolventes de falla se indican en la Tabla 6. A pesar de que los pesos unitarios obtenidos (Sección 5.1.2) fueron ligeramente menores a los indicados en la Tabla 6, las muestras se compactaron a 8 y 14 kN/m<sup>3</sup>, por ser los valores mínimos recomendados por la Administradora del Relleno, para edades de las muestras de 8 y 60 meses respectivamente. Cuando se midieron en campo los pesos unitarios indicados en 5.1.2, la Administradora del Relleno compactó de nuevo el material hasta lograr los valores mínimos de peso unitario establecidos.

### 5.2.3. Compactación de las muestras en la caja de corte

Las muestras previamente homogeneizadas, fueron compactadas en la caja de corte en tres capas de 4.4 cm de altura cada una, usando un martillo de 7 kg de masa. No se calculó ninguna energía de compactación específica, y el martillo fue usado únicamente para distribuir el material en el molde. La Fig. 5 ilustra el molde y la muestra durante la compactación de la primera capa.



Figura 5. Compactación de la muestra antes de la etapa de corte  
Fuente: Los autores

### 5.2.4. Procedimiento de ensayos de corte directo

Se realizaron ocho ensayos de resistencia al corte tipo UU, con el fin de obtener ocho envolventes de falla. En cada ensayo se probaron tres muestras bajo tres diferentes esfuerzos normales. Aunque inicialmente se programó utilizar para todas las muestras, esfuerzos normales de 50, 100 y 150 kPa; en el momento de aplicar los esfuerzos a las muestras con pesos específicos de 8 kN/m<sup>3</sup>, se generaron asentamientos diferenciales que imposibilitaron realizar los ensayos. Por esta razón, este grupo de muestras fue sometido a esfuerzos menores de 30, 70 y 110 kPa.

El criterio de falla en ensayos de corte directo en residuos sólidos, es definido cuando se presenta una reducción en el esfuerzo cortante, o cuando se alcanza un desplazamiento horizontal igual al 15% de la longitud [25]. Con base en lo anterior, el desplazamiento mínimo requerido para considerar falla de la muestra fue de 4,5 cm.

La velocidad de aplicación de la carga fue de 1,39 mm/min, y las pruebas de corte directo tipo (UU) fueron controladas por deformación. Se tomaron lecturas de carga cada 20 o 30 s, hasta finalizar la prueba. La etapa de corte fue de aproximadamente 30 minutos para todos los ensayos.

En los ensayos realizados, la falla fue presentada por exceso de deformación, y no por un pico de esfuerzo máximo, similar a lo que ocurre en suelos cohesivos normalmente consolidados o arenas sueltas.

## 6. Resultados y discusión

Esta sección contiene los resultados de los ensayos de resistencia al corte realizados, y el análisis de los parámetros estudiados.

Es necesario mencionar, que si previo a la etapa de corte las muestras no se encuentran saturadas, con lixiviados en este caso, los parámetros de resistencia al corte obtenidos son iguales en términos efectivos o totales, debido a que el exceso de presión de poros es igual a cero. Para ser consecuente con la literatura, y con el fundamento teórico de la mecánica de suelos, los parámetros de resistencia al corte obtenidos en esta investigación son descritos en términos efectivos ( $C'$ ) y ( $\Phi'$ ), debido a que de esta forma se presenta un comportamiento friccionante, con incremento en el esfuerzo cortante resistente cuando se aumenta el esfuerzo normal, como ocurrió durante los ensayos.

Aunque en mecánica de suelos, en parámetros efectivos la cohesión es expresada como una cohesión aparente o un intercepto de cohesión, encontrada por la dificultad de realizar ensayos de extensión para bajos esfuerzos normales, y no porque los suelos resistan esfuerzos de tensión; los residuos sólidos, debido a sus componentes, pueden presentar resistencia a la tensión con importantes magnitudes de cohesión, especialmente los residuos frescos.

Los resultados de los ensayos se resumen en la Tabla 7 y en la Fig. 6. De manera general, se puede notar que las mayores resistencias al esfuerzo cortante, identificadas como una posición más alta de las envolventes de falla, la tuvieron muestras con 8 meses de descomposición, pesos unitarios de 14 kN/m<sup>3</sup> y profundidad de 5 m.

Tabla 7.

Resumen de resultados, parámetros de resistencia al corte

| Ensayo | Edad (meses) | $\rho_w$ (kN/m <sup>3</sup> ) | Prof. (m) | $C'$ (kPa) | $\Phi'$ (°) |
|--------|--------------|-------------------------------|-----------|------------|-------------|
| 1      | 8            | 8                             | 3         | 24.9       | 31.6        |
| 2      | 8            | 14                            | 3         | 24.7       | 29.6        |
| 3      | 8            | 8                             | 5         | 31.4       | 29.1        |
| 4      | 8            | 14                            | 5         | 27.2       | 30.8        |
| 5      | 60           | 8                             | 3         | 9.1        | 34.7        |
| 6      | 60           | 14                            | 3         | 19.5       | 29.2        |
| 7      | 60           | 8                             | 5         | 17.6       | 33.0        |
| 8      | 60           | 14                            | 5         | 21.9       | 29.5        |

Fuente: Los autores

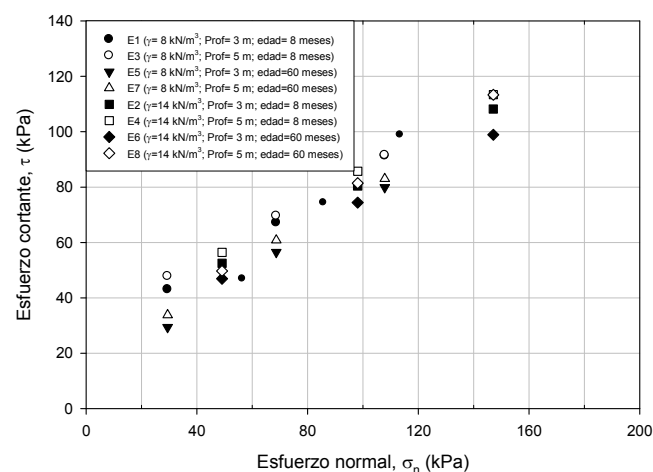


Figura 6. Resumen de resultados, espacio  $\tau$  vs  $\sigma_n$  para envolventes de falla

Fuente: Los autores

A continuación se presenta el análisis de los resultados de resistencia al esfuerzo cortante de las muestras. Dicho análisis se realiza en función del peso específico, profundidad y tiempo de descomposición. Los resultados también se comparan con valores internacionales usados para diseño y con otro relleno en Colombia.

### 6.1. Influencia del peso específico

Se compararon ensayos de igual profundidad y tiempo de descomposición, para diferentes pesos específicos. Las comparaciones realizadas fueron para los ensayos: [1 vs 2]; [3 vs 4]; [5 vs 6] y [7 vs 8]. Las Figs. 7, 8 presentan tales comparaciones, para muestras con tiempos de descomposición de 8 y 60 meses respectivamente. En estas figuras, símbolos blancos son comparados con símbolos negros, para las mismas condiciones de profundidad y tiempo de descomposición, con diferente peso específico.

De acuerdo con los resultados presentados en las Figs. 7, 8, y los valores de la Tabla 7, no hay una tendencia marcada entre el peso específico y los parámetros de resistencia al corte. En general, los parámetros ( $C'$ ) y ( $\Phi'$ ) aumentan o disminuyen según se cambien los otros parámetros de comparación.

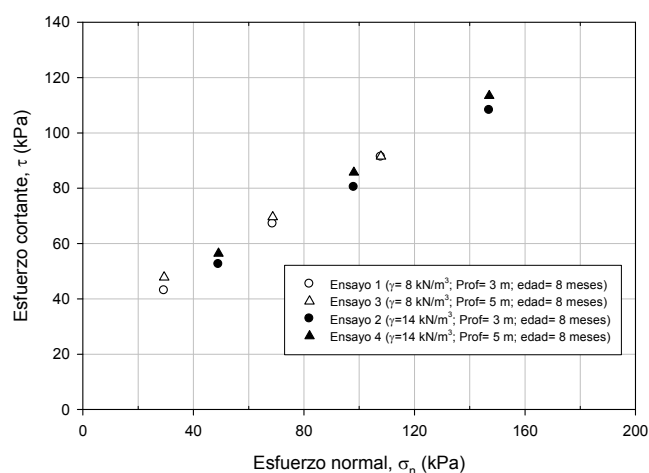


Figura 7. Influencia del peso específico en la resistencia (8 meses)

Fuente: Los autores

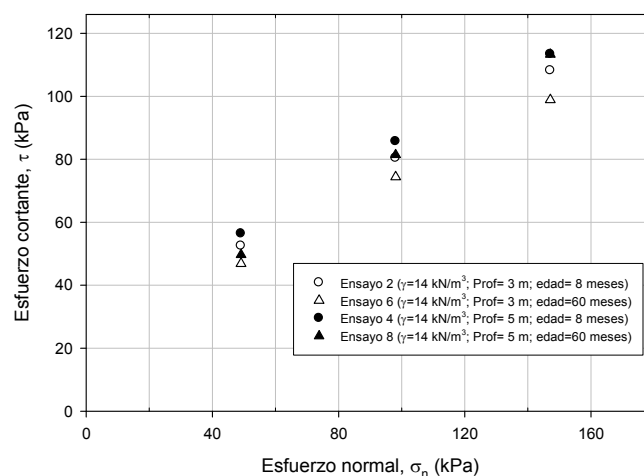


Figura 10. Influencia de la profundidad en la resistencia (14 kN/m³)

Fuente: Los autores

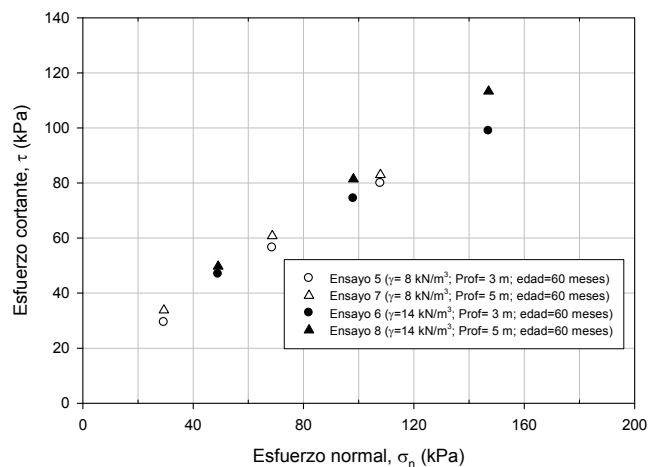


Figura 8. Influencia del peso específico en la resistencia (60 meses)

Fuente: Los autores

## 6.2. Influencia de la profundidad

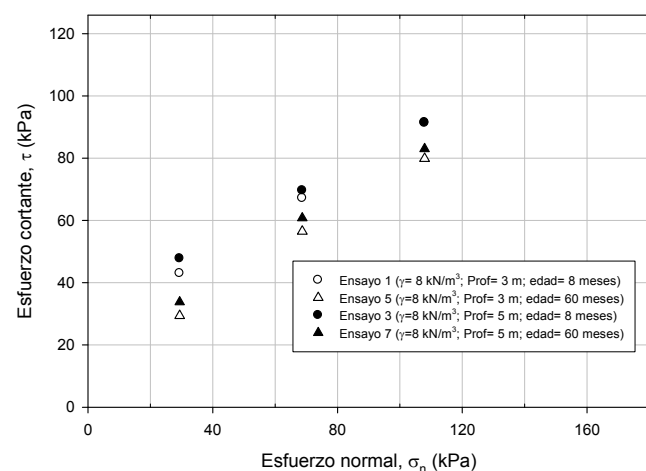


Figura 9. Influencia de la profundidad en la resistencia (8 kN/m³)

Fuente: Los autores

Se compararon los ensayos de igual tiempo de descomposición y peso específico para diferente profundidad. Las comparaciones realizadas fueron para los ensayos: [1 vs 3]; [5 vs 7]; [2 vs 4] y [6 vs 8]. Las Figs. 9, 10 presentan tales comparaciones, para pesos específicos de 8 y 14 kN/m³ respectivamente. En estas figuras, símbolos blancos son comparados con símbolos negros, para las mismas condiciones de tiempo de descomposición y peso específico, con diferente profundidad.

De acuerdo con los resultados presentados en las Figs. 9, 10, y los valores de la Tabla 7, los ensayos de mayor profundidad generaron mayor resistencia al esfuerzo cortante. Esta mayor resistencia es definida por envolventes de falla más altas, debido principalmente al mayor valor de la cohesión ( $C'$ ).

## 6.3. Influencia del tiempo de descomposición

Se compararon los ensayos de igual profundidad y peso específico para diferentes tiempos de descomposición. Las comparaciones realizadas fueron para los ensayos: [1 vs 5]; [3 vs 7]; [2 vs 6] y [4 vs 8]. Las Figs. 11, 12 presentan tales comparaciones para pesos específicos de 8 y 14 kN/m³ respectivamente. En estas figuras, símbolos blancos son comparados con símbolos negros para las mismas condiciones de profundidad y peso específico, con diferente tiempo de descomposición.

De acuerdo con los resultados presentados en las Figs. 11, 12 y en la Tabla 7, se observa una marcada influencia del tiempo de descomposición en la resistencia al corte, con valores mayores para las muestras más recientes. Las muestras con un tiempo de descomposición biológica de 8 meses presentaron en promedio mayores valores de ( $C'$ ), y aunque algunos valores de ( $\Phi'$ ) fueron menores, la posición de las envolventes de falla fue superior, comparada con la de muestras con tiempos de descomposición biológica de 60 meses, debido al notable mayor valor de la cohesión.

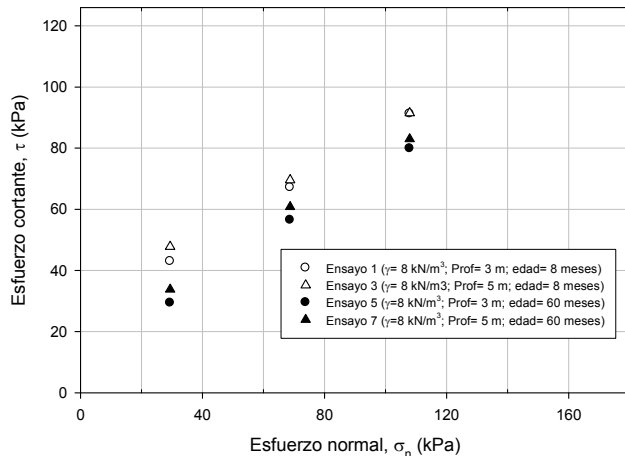


Figura 11. Influencia del tiempo de descomposición (8 kN/m<sup>3</sup>)  
Fuente: Los autores

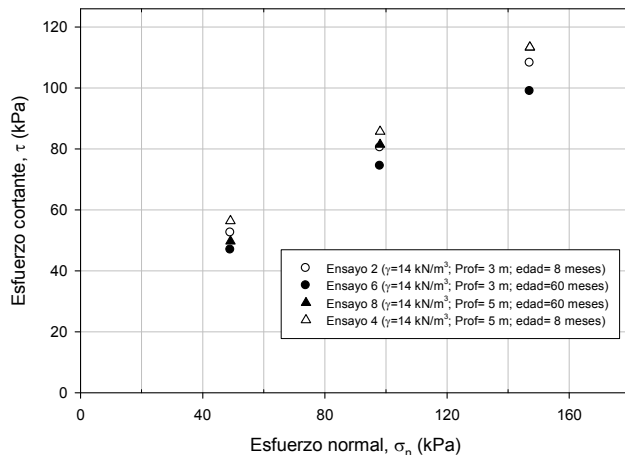


Figura 12. Influencia del tiempo de descomposición (14 kN/m<sup>3</sup>)  
Fuente: Los autores

Los resultados encontrados son acordes a lo indicado por [9], quienes afirman que el comportamiento geotécnico de los residuos sólidos es inicialmente cohesivo y se transforma en friccionante, debido a procesos mecánicos y biológicos. En otras investigaciones, aunque sin encontrar una tendencia definida, se halló que en general los valores de cohesión disminuyen y los valores de fricción aumentan, para mayores tiempos de descomposición [10]. Otros autores han afirmado que muestras con alto contenido de material biodegradable, tienen también un alto valor de cohesión [22], lo cual coincide con lo encontrado en esta investigación.

#### 6.4. Comparación de los resultados con valores internacionales [26-28]

En la revisión de literatura se encontraron tres envolventes de falla, propuestas por tres autores, para diseño de rellenos sanitarios. La Fig. 13 ilustra tales envolventes, junto con los resultados de los ensayos realizados en esta investigación. En la Fig. 13 se puede notar que en general, los valores de resistencia del relleno sanitario Presidente, se encuentran dentro de lo esperado para este tipo de materiales,

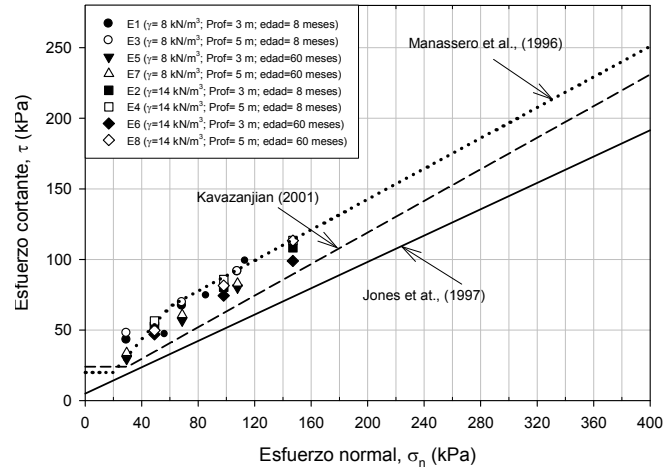


Figura 13. Comparación de resultados con envolventes de diseño internacionales  
Fuente: Los autores

acercándose más hacia el límite superior [26]. No obstante, debe resaltarse que los rangos propuestos son bastante amplios, y valores cercanos a límites opuestos, tendrán importantes variaciones en su comportamiento geotécnico. También debe tenerse en cuenta que los rangos propuestos no diferencian entre tiempo de descomposición, densidades, composición, u otras características, que como se mostró en las secciones anteriores, y como es reportado en la literatura (e.g., [6,9]) afectan la resistencia al corte de los rellenos.

#### 6.5 Comparación de los resultados con otro relleno en Colombia

Las propiedades de resistencia al corte del relleno Doña Juana en Bogotá han sido reportadas [22]. La Fig. 14 compara resultados de ensayos de resistencia al corte directo del Relleno Doña Juana con resultados de resistencia al corte directo del Relleno Presidente, para muestras relativamente recientes (12 y 8 meses de descomposición respectivamente). Para propósitos de comparación, en la Fig. 14 también se incluyen los valores internacionales sugeridos para diseño, discutidos en el numeral anterior. En la Fig. 14 se puede observar que las muestras del relleno Doña Juana también presentan altos valores de cohesión, incluso mayores que los del Relleno Presidente. Tales resultados pueden corroborar lo indicado en el Numeral 6.3, referente a que el alto valor de la cohesión puede estar relacionado con el contenido de material biodegradable, especialmente para muestras frescas o relativamente recientes, donde dicho material está iniciando su proceso de descomposición. Como se indicó en la Tabla 2, el relleno Dona Juana y el relleno Presidente presentan un alto contenido de material biodegradable, y ambos tuvieron importantes valores de cohesión, comparados con valores de rellenos internacionales, que en general contienen menos material orgánico.

#### 7. Conclusiones y observaciones

En esta investigación, los parámetros de resistencia al corte del relleno Presidente en el Valle del Cauca, fueron

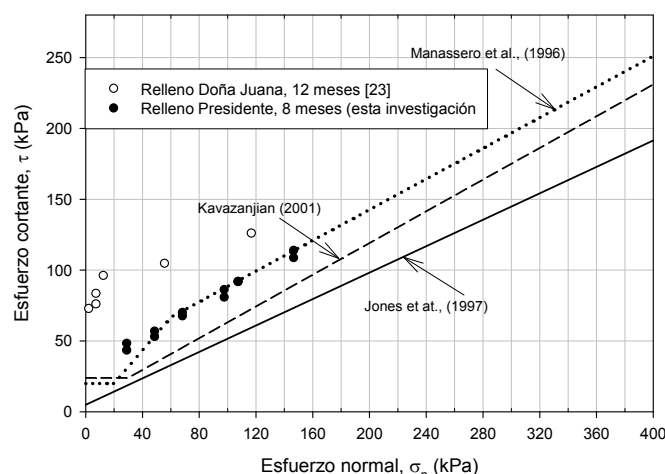


Figura 14. Comparación de resultados con otro relleno en Colombia  
Fuente: Los autores

determinados. Los resultados fueron evaluados en función del peso específico, la profundidad y el tiempo de descomposición. Los parámetros de resistencia encontrados fueron comparados con valores internacionales recomendados para diseño, y con resultados experimentales obtenidos para otro relleno en Colombia.

No se encontró una dependencia significativa entre la resistencia al corte de los residuos sólidos y su peso específico.

En esta investigación se encontró que las muestras tomadas a la mayor profundidad, 5 m, generaron envolventes de falla ligeramente superiores que las muestras tomadas a 3 m. Muestras a mayor profundidad han soportado esfuerzos efectivos mayores, lo cual podría haber generado procesos en la matriz del material que incrementan la cohesión de las partículas a nivel micro. No obstante, esto no ha sido verificado y debería investigarse en detalle con ensayos más específicos, especialmente teniendo en cuenta que los ensayos fueron realizados sobre muestras reconstituidas, bajo iguales pesos unitarios.

Se encontraron marcadas dependencias entre el tiempo de descomposición de las muestras, y la resistencia al corte. Los residuos con menor tiempo de descomposición (8 meses) generaron envolventes de falla más altas, con valores mayores de  $(C')$ , a pesar de tener un ángulo de fricción interna  $(\Phi')$  ligeramente inferior, en algunos casos. Lo anterior coincide con lo expuesto por otros autores [9, 10], quienes han sugerido que el comportamiento geotécnico de los residuos sólidos es inicialmente cohesivo y se transforma en friccionante, debido a procesos mecánicos y biológicos.

La alta cohesión de los residuos del relleno Presidente encontrada en esta investigación, y del relleno Doña Juana en Bogotá [22], podría ser explicada por el alto contenido de material orgánico que presentan ambos rellenos.

Las propiedades de resistencia al corte encontradas para el relleno Presidente, están dentro de los valores esperados para este tipo de materiales, acercándose al límite superior de valores internacionales propuestos para diseño. No obstante, los altos valores corresponden a residuos frescos con alta cohesión, la cual tiende a decrecer a medida que se descompone el material orgánico.

Los valores de resistencia obtenidos en la presente investigación no se deben implementar con el fin de diseñar o controlar la operación de otros rellenos sanitarios, debido a que cada relleno, incluso cada celda de trabajo dentro del relleno, requiere un estudio específico. Sin embargo, si los componentes y tiempos de descomposición de otros rellenos son similares a los de las celdas analizadas, los datos de resistencia aquí reportados podrían servir como información preliminar para diseño.

Se sugiere realizar más investigaciones, incluyendo el efecto que tienen en la resistencia variables como el contenido de humedad, orientación de las fibras de la matriz, tipo de componentes y distribución granulométrica de los rellenos. También es recomendable usar mayores profundidades de muestreo, con el fin de incluir el efecto de la presión de poros de los lixiviados. En tal caso, debe tenerse especial cuidado en el proceso de muestreo, con el fin de evitar inestabilidades del relleno o contaminación ambiental.

## Agradecimientos

Los autores de este artículo desean agradecer a la entidad administradora del relleno, Proactiva, quienes colaboraron con los permisos para el acceso, al igual que facilitaron los equipos para la toma de muestras y para la determinación de pesos unitarios en el campo. También se reconoce el apoyo económico para el uso y construcción de equipos, brindado por la Universidad del Valle mediante la Vicerrectoría de Investigaciones y el Laboratorio de Suelos y Pavimentos.

## Referencias

- [1] Suárez, E. and Cardona-Gallo, S., Nitrogen removal from landfill leachate using a sequential biological passive system. DYNA, 80 (178), pp. 37-43, 2013.
- [2] Byrne, R.J., Design issues with strain-softening interfaces in landfill liners, Proceedings of Waste Technology, Session 4, Paper 4, 1994.
- [3] Eid, H.T., Stark, T.D., Evans, W.D. and Sherry, P.E., Municipal solid waste slope failure. I: Waste and foundation soil properties. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 126 (5), pp. 397-407, 2000. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:5(397)
- [4] Hendron, D.M., Fernandez, G., Prommer, P.J., Giroud, J.P. and Orozco, L.F., Investigation of 27<sup>th</sup> September 1997 slope failure at the Doña Juana landfill, Proceedings of 7<sup>th</sup> International Waste Management and Landfill Symposium, 1999. pp. 545-554.
- [5] Merry, S.M., Kavazanjian Jr., E. and Fritz, W.U., Reconnaissance of the July 10, 2000, Payatas landfill failure. Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE, 19, pp. 100-107, 2005. DOI: 10.1061/(ASCE)0887-3828(2005)19:2(100)
- [6] Koelsch, F., Fricke, K., Mahler, C. and Damanhuri, E., Stability of landfills – The Bandung dumpsite disaster, Proceedings of 10<sup>th</sup> International Waste Management and Landfill Symposium, 2005.
- [7] Tchobanoglous, G., Gestión Integral de Residuos Sólidos. California: McGrawHill, 2003.
- [8] Dixon, N., Russel, D. and Jones, V., Engineering properties of municipal solid waste. Geotextiles and Geomembranes, 23, pp. 205-233, 2005. DOI: 10.1016/j.geotextmem.2004.11.002
- [9] Espinoza, A. y González, A., La acumulación de basura como material geotécnico II: Comportamiento de las basuras. Revista de Ingeniería, Universidad de los Andes, 14, pp. 56-69, 2001.
- [10] Reddy, K.R., Gangathulasi, J., Parakalla, N., Hettiarachchi, H., Bogner, J. and Lagier, T., Compressibility and shear strength of municipal solid waste under short-term leachate recirculation

- operations. *Waste Management & Research*, 27, pp. 578-587, 2009. DOI: 10.1177/0734242X09103825
- [11] Collazos, H., Diseño y operación de rellenos sanitarios. Bogotá: AIDIS, 2001.
- [12] EMAPA., Relleno sanitario Colomba-Guabal ubicado en el Valle del Cauca, informe de impacto ambiental, Santiago de Cali, CVC, 2008, 5 P.
- [13] SCC Engineers., Methane to marke. Informe de evaluación relleno sanitario el Navarro Cali, Colombia, 2007, 20 P.
- [14] Lemos, S., Karimpour-Fard, M., Shariatmadari, N., Carvalho, M. and do Nascimento, J., Evaluation of the geotechnical properties of MSW in two Brazilian landfills. *Waste Management*, 30, pp. 2579-2591, 2010. DOI: 10.1016/j.wasman.2010.07.019
- [15] Zekkos, D., Athanasopoulos, G.S. and Bray, J.D., Large-scale direct shear testing of municipal solid waste. *Waste Management*, 30 pp. 1544-1555, 2010. DOI: 10.1016/j.wasman.2010.01.024
- [16] Landva, A. and Clark, J.I., *Geotechnics of waste fills. Theory and practice*. ASTM STP 1070, pp. 86-106, 1990.
- [17] Richardson, G. and Reynolds, D., Geosynthetic considerations in a landfill on compressible clays, *Proceedings of Geosynthetics*, 2. Industrial Fabrics Association International, 1991.
- [18] Houston, W.N., Houston, S.L., Liu, J.W., Elsayed, A. and Sanders, C.O., In situ testing methods for dynamic properties of MSW landfills. *Earthquake design and performance of solid waste landfills*. ASCE Geotechnical Special Publication, 54, pp. 73-82, 1995.
- [19] Edinçiler, A. Benson, C.H. and Edil, T.B., Shear strength of municipal solid waste. Interim Report – Year 1, *Environmental Geotechnics Report 96-2*, Madison, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Wisconsin, Madison, 1996.
- [20] Kavazanjian Jr., E., Seismic design of solid waste containment facilities, *Proceedings of the Eighth Canadian Conference on Earthquake Engineering*, pp. 51-89, 1999.
- [21] Mazzucato, N., Simonini, P. and Colombo, S., Analysis of block slide in a MSW landfill, *Proceedings of 7<sup>th</sup> International Waste Management and Landfill Symposium*, pp. 537-544, 1999.
- [22] Caicedo, B., Yamin, L., Giraldo, E. and Coronado, O., Geomechanical properties of municipal solid waste in Doña Juana sanitary landfill, *Proceedings of the Fourth International Congress on Environmental Geotechnics, Brazil*, 1, pp. 177-182, 2002.
- [23] Mahler, C.F. and De Lamare Netto, A., Shear resistance of mechanical biological pre-treated domestic urban waste, *Proceedings of 9<sup>th</sup> International Waste Management and Landfill Symposium*, pp. 6-10, 2003.
- [24] ASTM International. Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions, *Standard ASTM D 3080*, 1998.
- [25] Koelsch, F., Shear strength of waste, *Proceedings of 3<sup>rd</sup> International Workshop. Hydro-Physico-Mechanics of Landfills*, pp. 10-13, 2009.
- [26] Manassero, M., Van Impe, W.F. and Bouazza, A., Waste disposal and containment, *Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Congress on Environmental Geotechnics*, 3, pp. 193-242, 1996.
- [27] Jones, D.R.V., Taylor, D.P. and Dixon, N., Shear strength of waste and its use in landfill stability analysis, *Proceedings of Geoenvironmental Engineering Conference*. Thomas Telford, pp. 343-350, 1997.
- [28] Kavazanjian, Jr. E., Mechanical properties of municipal solid waste, *Proceedings of 8<sup>th</sup> International Waste Management and Landfill Symposium*, pp. 415-424, 2001.

**E.A. Sandoval-Vallejo**, es profesor asistente de la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática de la Universidad del Valle, Cali, Colombia. MSc. en Ciencias en Ingeniería Civil de la Universidad de Puerto Rico en Mayagüez, Estados Unidos; y actualmente estudiante de Doctorado en Filosofía de la Universidad de Purdue en West Lafayette, Estados Unidos. Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica, Eólica, Geotécnica y Estructural (G-7) de la Universidad del Valle, Cali, Colombia. Principales temas de interés en investigación: comportamiento de suelos bajo cargas dinámicas, respuesta de túneles bajo cargas sísmicas, interacción suelo-estructura y resistencia al esfuerzo cortante en suelos y rellenos sanitarios.  
ORCID: 0000-0003-3557-2861

**A.M. Ramírez-Tascón** es Ingeniero Civil de la Universidad del Valle, Cali, Colombia. Sus áreas de actuación se han enfocado en geotecnia y medio ambiente. Su tesis de pregrado: “Resistencia al corte en relleno sanitarios” fue desarrollada para un caso específico: El Relleno Sanitario Presidente, en el Valle del Cauca, Cali, Colombia, bajo la dirección del profesor Eimar Sandoval. Actualmente, se prepara para adelantar estudios de postgrado en ingeniería civil en los Estados Unidos.  
ORCID: 0000-0002-5547-0654.

**D.F. Cuarán**, es Ingeniero Civil de la Universidad del Valle, Cali, Colombia. Su tesis de pregrado: “Resistencia al corte en relleno sanitarios” fue desarrollada para un caso específico: El Relleno Sanitario Presidente, en el Valle del Cauca, Cali, Colombia, bajo la dirección del profesor Eimar Sandoval. Desde que estaba finalizando sus estudios de pregrado y hasta la actualidad, ha trabajado para la empresa: Solarte y Cia. Ingenieros Calculistas, por esta razón acaba de iniciar estudios de postgrado en estructuras en la Universidad del Valle, Cali, Colombia.  
ORCID: 0000-0001-8736-7881.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN  
FACULTAD DE MINAS

## Área Curricular de Ingeniería Civil

### Oferta de Posgrados

Especialización en Vías y Transportes  
Especialización en Estructuras  
Maestría en Ingeniería - Infraestructura y Sistemas  
de Transporte  
Maestría en Ingeniería – Geotecnia  
Doctorado en Ingeniería - Ingeniería Civil

Mayor información:

E-mail: asisacac\_med@unal.edu.co  
Teléfono: (57-4) 425 5172

## Energy efficiency in the zeolite impact crushing plant of San Andrés (Holguín, Cuba)

José Ramón Hechavarría-Pérez <sup>a</sup>, Alfredo L. Coello-Velázquez <sup>b</sup>, Fernando Daniel Robles-Proenza <sup>a</sup>  
& Juan María Menéndez-Aguado <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Universidad de Holguín, Holguín, Cuba. [jhperez@facing.uho.edu.cu](mailto:jhperez@facing.uho.edu.cu)

<sup>b</sup> Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Moa, Cuba. [acoello@ismm.edu.cu](mailto:acoello@ismm.edu.cu)

<sup>c</sup> Escuela Politécnica de Mieres. Universidad de Oviedo, Oviedo, España. [aguado@uniovi.es](mailto:aguado@uniovi.es)

Received: October 9<sup>th</sup>, 2014. Received in revised form: July 29<sup>th</sup>, 2015. Accepted: July 31<sup>th</sup>, 2015.

### Abstract

The present work deals with the impact crusher energy efficiency at San Andres Zeolitic Plant. Varying the operational parameters levels (rotor velocity, hammer row number and crusher capacity) were carried up two experimental series: First series was aimed to obtain the influence of the operational parameters on the power consumed by the crusher motor; the second series evaluated the crusher specific energy consumption behavior. First series empirical model obtained describes the influence of operational parameters on power consumption. Also the relationship among specific energy consumption and crusher speed and capacity were obtained. The most efficient operational regimen corresponded to 1100 rpm of the rotor velocity, 2 hammer row numbers and 15 t/h of crusher capacity.

**Keywords:** Energy Consumption. Energy efficiency. Impact crushers.

## Eficiencia energética en la trituración por impactos en la planta de zeolitas de San Andrés (Holguín, Cuba)

### Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo la evaluación a escala industrial de la eficiencia energética de una trituradora de martillos en la planta de zeolitas de San Andrés. Variando los niveles de las variables de operación (velocidad del rotor, cantidad de martillos y productividad del triturador), se realizaron dos series de ensayos para determinar su influencia en la potencia consumida por el motor de la trituradora; y la influencia sobre energía específica en trituración. El modelo del experimento obtenido de la primera serie de ensayos demostró la influencia de las variables de operación en la potencia consumida por el motor de la trituradora. La relación entre la energía consumida en la trituración y productividad y velocidad de la trituradora mostró su fuerte influencia en los indicadores energo-tecnológicos. El régimen más eficiente corresponde a los niveles de 1100rpm de velocidad del rotor, 2 martillos y 15 t/h de productividad.

**Palabras clave:** Consumo de energía. Eficiencia energética. Indicadores energo-tecnológicos. Trituración por impacto.

### 1. Introducción

El uso racional de la energía en los procesos industriales, resulta de gran importancia y actualidad. Los procesos de trituración y molienda de materiales consumen enormes cantidades de energía.

Se estima que de toda energía generada en el mundo, de un 3 a un 4 %, se destina a las operaciones de reducción de tamaño [4], y solo en Estados Unidos a estas operaciones se

dedica el 29,3% de toda la energía consumida en la minería. Estos elementos muestran que la mejora de la eficiencia energética de las operaciones de reducción de tamaño es de interés de un grupo importante de científicos e investigadores [2,15].

A mediados del siglo XIX, Rittinger [10,12] enuncia un modelo que relaciona la energía de fragmentación con el tamaño de las partículas fragmentadas. Modelos similares fueron postulados por Kirpichov y Bond [1,3,11]. Estas

relaciones consideran que la energía consumida en la reducción de tamaño, depende de las características del mineral y de la variación del tamaño antes y después de la trituración (ec. 1).

$$E = W \cdot \left( \frac{1}{p^x} - \frac{1}{f^x} \right) \quad (1)$$

Donde: E es la energía específica necesaria para la fragmentación de las partículas, kWh/t; W representa un índice energético, kWh/t; x es un valor constante para un mismo modelo, mientras que f y p representan el tamaño del material de alimentación y del producto final, respectivamente.

Al margen de las valiosas críticas científicas realizadas por Hukki [9], Coello [1], Mosher y Tague [13], Morrell [12], el modelo de Bond aun es empleado ampliamente en el diseño y construcción de molinos y trituradoras [3, 4, 14].

Hukki [9] y Morrell [12] exponen modelos donde el parámetro x de la ec. (1) es una función que depende del tamaño de las partículas. En las trituradoras de impacto, esto concuerda con el hecho de que la energía cinética necesaria para la fragmentación de las partículas de mineral varía con su tamaño, de acuerdo a varios autores, como es recogido por Hechavarría [8] y Osorio [14].

A pesar de que los modelos antes mencionados de Hukki, Coello y Morrell representan una mejor aproximación de los fenómenos de reducción de tamaño, sin embargo, su empleo se visto limitado por las complejidades asociadas al aparato experimental necesario para su implementación.

Al margen de las limitaciones que enfrenta la modelación y simulación de la trituración por impacto, mucho se ha avanzado en los temas relacionados con el comportamiento granulométrico, los cuales han sido tratados con amplitud en los trabajos de Shi y Kojovic [18,19], Hechavarría [8], Coello-Velázquez [5] y Da Cunha [6].

Con respecto al estudio del comportamiento energético, Taggart [20] de forma gráfica lo presenta para una trituradora de impacto tomando como material la grava de río. Los trabajos de Hechavarría [8], Shi y Kojovic [18], constituyen interesantes evidencias que expresan las tendencias presentadas por Taggart para diferentes minerales y maquinarias. Shi [19] propone un interesante modelo que relaciona la energía consumida por la trituradora de impacto con algunas variables de operación partiendo de un volumen apreciable de datos experimentales.

Nikolov [8] considera la velocidad de impacto como variable importante en la modelación de trituración. Sadrai [16] por su parte, reporta la incidencia de la velocidad de impacto en su eficiencia energética. Coello [3] demuestra la influencia del régimen operacional en los indicadores energo-tecnológicos de la molienda de minerales a escala de laboratorio, semi-industrial e industrial. Hechavarría [8] reporta la influencia de la velocidad del rotor, la cantidad de martillos y la productividad del molino en la potencia consumida por el motor de la trituradora de impacto.

Estas tendencias muestran que la investigación experimental de la influencia de las variables de operación en los indicadores energo-tecnológicos de las de la trituración

por impacto sigue siendo una herramienta indispensable en su estudio y búsqueda de regímenes tecnológicos de operación más eficientes.

Es objetivo del presente trabajo exponer los principales resultados de la evaluación de eficiencia energética de la trituradora de impacto Litpman de la planta de zeolitas de San Andrés.

## 2. Material y método

El trabajo se realizó en una trituradora tipo Litpman 24 X 18 en la planta zeolitas de San Andrés, con dimensiones del rotor (diámetro x ancho) 520 X 410 mm y de una productividad máxima de 20 t/h. La composición granulométrica de la roca alimentada fue determinada por el análisis de tamiz utilizando los tamices de 25,0; 12,0; 6,5; 5,0; 3,5 y 1,0mm. Las muestras fueron tomadas garantizando la representatividad de las mismas.

Para la realización del trabajo considerando las condiciones industriales del objeto, se decidió realizar dos series de experimentos: uno orientado al estudio del comportamiento de la potencia consumida por el motor del triturador y el otro, dirigido la valoración del comportamiento de la energía específica consumida en la trituración. Para el primer caso, la velocidad del rotor de la trituradora de varió en dos niveles (1100 rpm y 1500 rpm), mientras que la cantidad de martillos fue de 2 y 4. Para cada combinación de estas dos variables, la productividad de la trituradora se varió en los niveles de 0, 5, 10 y 15 t/h, para un total de 16 ensayos con 5 réplicas cada uno. La duración de los ensayos fue de 8 horas (un turno de trabajo). Las variables operacionales y sus niveles de variación se muestran en la Tabla 1. Durante cada ensayo fue medida la potencia consumida por el motor del triturador con un analizador marca Chauvin de nacionalidad francesa debidamente verificado por la Oficina Territorial de Normalización (OTN). A partir de estos resultados fue calculada para cada ensayo, la energía consumida por cada tonelada de mineral alimentado a la trituradora.

Para el segundo caso, las tres variables operacionales fueron variadas solo en dos niveles (Tablas 3 y 4 del Apéndice). La composición granulométrica y la productividad de las clases (8-3mm), (3-1mm) y (1-0mm) que constituyen los productos finales fueron determinadas según la metodología reportadas en Coello [1] y Menéndez-Aguado [10,11]. Las mediciones de la potencia consumida fueron determinadas de forma similar al experimento anterior, las mediciones anteriores fueron consideradas, a partir de la cual fue determinada la energía consumida por cada tonelada de mineral triturado (eficiencia energética).

## 3. Análisis y discusión de los resultados

La composición granulométrica del producto alimentado a la trituradora aparece en la Fig. 1.

Según el grado de linealidad de la característica granulométrica mostrada en la Fig. 1, la roca zeolítica material alimentado a la trituradora LIPTMAN es altamente homogénea, no solo desde el punto de vista granulométrico, sino también, desde el punto de vista de su composición substancial que finalmente determina sus propiedades físicas y físico-mecánicas.

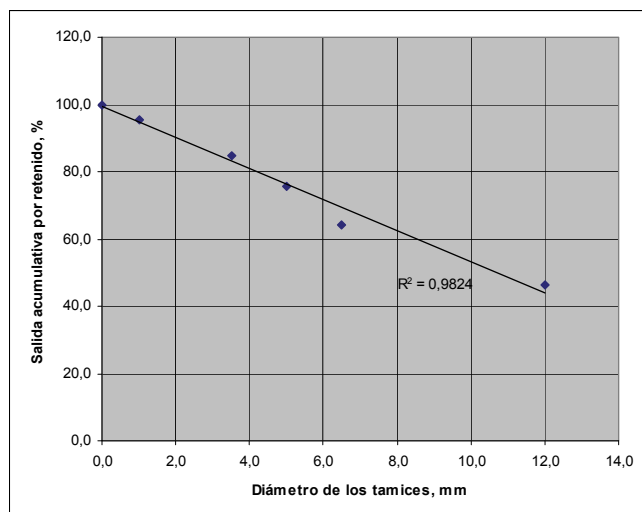


Figura 1. Característica granulométrica del material alimentado a la trituradora LITPMAN.

Fuente: Elaboración propia

El estudio de la influencia de las variables operacionales sobre la potencia consumida por el motor de la trituradora aparece en la Tabla 1. El análisis de varianza del experimento demuestra que la velocidad del rotor (V), la productividad de la trituradora (Q) y el número de filas de martillos (M) resultan significativamente influyentes en el comportamiento de la potencia consumida por el motor de la trituradora para una probabilidad de 95 %.

El modelo expresado en la ec. 2, sintetiza la dependencia entre las variables estudiadas.

$$N = 0,011 \cdot V + 0,799 \cdot Q + 0,736 \cdot M \quad (2)$$

La comparación entre los valores experimentales y calculados por el modelo mostrado en la Fig. 2 valida la reproducibilidad de modelo. El valor del coeficiente de correlación ( $R=0,97$ ), el estadígrafo de Chi cuadrado y las comparaciones de la media y la varianza confirman que el modelo (1) es una buena aproximación a los valores experimentales.

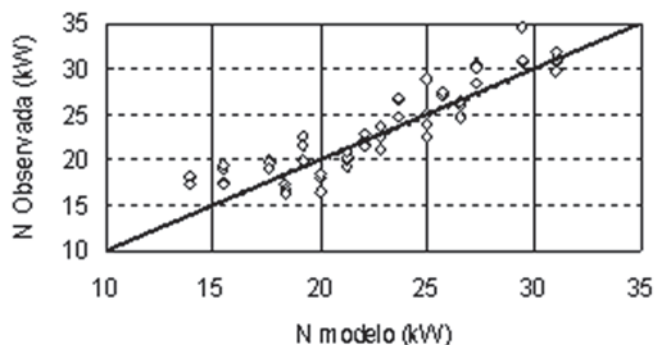


Figura 2. Relación entre los valores experimentales y modelados de la potencia consumida por el motor de la trituradora.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 1

Influencia de las variables operacionales en la potencia consumida por el motor de la trituradora LITPMAN

| N  | Velocidad rotor, rpm | Cantidad de martillos, n | Productividad, t/h | Potencia, kW |
|----|----------------------|--------------------------|--------------------|--------------|
| 1  | 1100                 | 2                        | 0                  | 17,7         |
| 1  | 1100                 | 2                        | 0                  | 17,7         |
| 2  | 1100                 | 2                        | 5                  | 19,4         |
| 3  | 1100                 | 2                        | 10                 | 20,1         |
| 4  | 1100                 | 2                        | 15                 | 25,1         |
| 5  | 1100                 | 4                        | 0                  | 18,3         |
| 6  | 1100                 | 4                        | 5                  | 21,4         |
| 7  | 1100                 | 4                        | 10                 | 22,8         |
| 8  | 1100                 | 4                        | 15                 | 25,5         |
| 9  | 1500                 | 2                        | 0                  | 16,7         |
| 10 | 1500                 | 2                        | 5                  | 22,1         |
| 11 | 1500                 | 2                        | 10                 | 27,3         |
| 12 | 1500                 | 2                        | 15                 | 33,2         |
| 13 | 1500                 | 4                        | 0                  | 17,4         |
| 14 | 1500                 | 4                        | 5                  | 26,2         |

Fuente: Elaboración propia

Estos resultados confirman los trabajos de Coello [3] y Coello-Velázquez [4,5], quienes demostraron que para la molienda del mineral laterítico las variables operacionales también influyen significativamente tanto en la potencia consumida por el motor del molino, como en la energía consumida por tonelada de mineral alimentado y por tonelada de mineral molido.

La Fig. 3 muestra la influencia de la productividad en la alimentación de la trituradora y la velocidad del rotor en la energía consumida en la trituración del material. Resulta interesante que la curva de dependencia de la energía consumida por tonelada de mineral alimentado de la productividad de la trituradora se desplaza hacia el incremento del primero con iguales características, al aumentar la velocidad de rotor de 1100 hasta 1500. Siendo así, podría plantearse que el incremento de la velocidad del rotor en los niveles estudiados, incrementa el consumo de energía sin un aporte substancial en la trituración de las rocas zeolíticas.

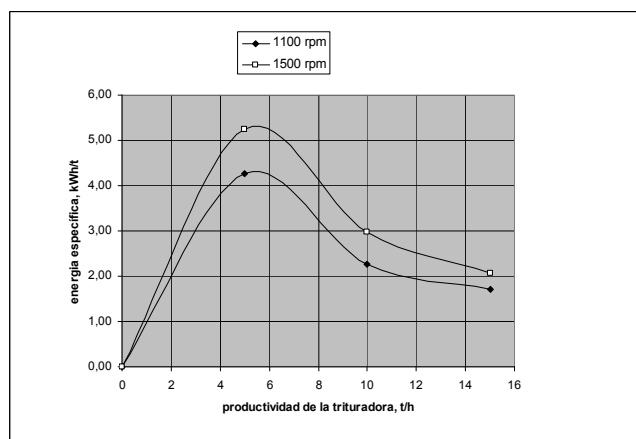


Figura 3. Comportamiento de la energía consumida por tonelada de mineral alimentado en función de la productividad de la trituradora y la velocidad del rotor.

Fuente: Elaboración propia

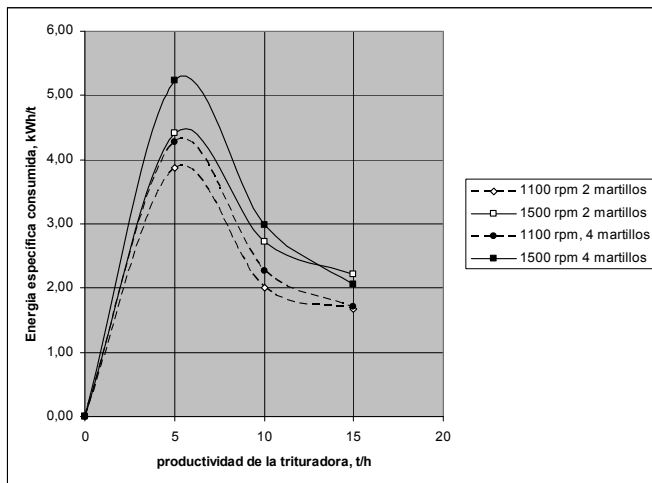


Figura 4. Comportamiento de la energía específica consumida tonelada de mineral alimentado.

Fuente: Elaboración propia

Estos elementos se corroboran con los resultados de la Fig. 4. Variando la velocidad del rotor de la trituradora y la cantidad de martillos se obtienen una familia de curvas regulares del comportamiento de la energía específica, donde la velocidad del rotor influye con más fuerza sobre la energía específica consumida en la trituración de las rocas zeolíticas para los primeros intervalos de productividades (hasta 10t/h).

Tomando como referencia los trabajos de Bond, Coello [3] considera que para evaluar rigurosamente la eficiencia del molino y de la reducción de tamaño en general, el mejor indicador es el que considera el contenido de la clase nuevamente formada. Es obvio que este indicador de la eficiencia energética tiene en cuenta la diferencia en el contenido de la clase de cálculo de producto final y el producto inicial. Comparando los indicadores de la energía consumida por cada tonelada de mineral triturado, es posible seleccionar el régimen tecnológico más eficiente.

Los resultados de la eficiencia energética de la trituradora aparecen en la Tabla 2. Estos resultados muestran que las variables operacionales estudiadas influyen decididamente en la eficiencia energética de la trituración de la zeolita en el triturador LITPMAN.

Así, el mejor régimen tecnológico corresponde a los niveles operacionales de 1100 rpm de velocidad de rotor, dos martillos y una productividad de 15 t/h. La eficiencia energética del proceso resultante es de 4,4 kWh/t; 4,7 kWh/t y 7,5 kWh/t para los productos (8-3mm), (3-1mm) y (1-0mm) respectivamente.

Esta regularidad es consecuente con los preceptos teóricos relacionados con la necesidad de incrementar el consumo energético al disminuir el tamaño de trituración.

## 4. Conclusiones

Los resultados del trabajo muestran que las variables operacionales estudiadas influyen significativamente en la potencia consumida por el motor de la trituradora. El modelo del experimento demuestra que tanto la velocidad del rotor como la cantidad de martillos y la productividad influyen positivamente en la potencia consumida por el motor.

Tabla 2

Influencia de las variables operacionales en los indicadores energéticos del triturador LITPMAN.

| Variables de operación   |                          |                                     | Eficiencia del triturador, kWh/t |               |               |
|--------------------------|--------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|---------------|---------------|
| Velocidad del rotor, rpm | Cantidad de Martillos, n | Productividad del triturador, (t/h) | clase (8-3mm)                    | clase (3-1mm) | clase (1-0mm) |
| 1100                     | 2                        | 5                                   | 14,1                             | 9,6           | 15,0          |
| 1100                     | 2                        | 15                                  | 4,4                              | 4,7           | 7,5           |
| 1100                     | 4                        | 5                                   | 12,6                             | 10,8          | 19,8          |
| 1100                     | 4                        | 15                                  | 4,2                              | 5,1           | 8,0           |
| 1500                     | 2                        | 5                                   | 15,3                             | 11,0          | 15,4          |
| 1500                     | 2                        | 15                                  | 6,9                              | 5,3           | 9,0           |
| 1500                     | 4                        | 5                                   | 21,3                             | 12,4          | 17,6          |
| 1500                     | 4                        | 15                                  | 5,8                              | 5,6           | 7,0           |

Fuente: Elaboración propia

## 5. Apéndice

Tabla 3.

Comportamiento de la salida de las clases granulométricas en función de las variables operacionales.

| Variables de operación   |                          |                                     | salida de las clases, % |               |               |
|--------------------------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------|---------------|---------------|
| Velocidad del rotor, rpm | Cantidad de Martillos, n | Productividad del triturador, (t/h) | clase (8-3mm)           | clase (3-1mm) | clase (1-0mm) |
| 1100                     | 2                        | 5                                   | 27,6                    | 40,4          | 25,8          |
| 1100                     | 2                        | 15                                  | 38,0                    | 35,6          | 22,4          |
| 1100                     | 4                        | 5                                   | 34,0                    | 39,5          | 21,6          |
| 1100                     | 4                        | 15                                  | 40,6                    | 33,3          | 21,2          |
| 1500                     | 2                        | 5                                   | 28,9                    | 40,1          | 28,8          |
| 1500                     | 2                        | 15                                  | 32,0                    | 42,0          | 24,7          |
| 1500                     | 4                        | 5                                   | 24,6                    | 42,3          | 29,7          |
| 1500                     | 4                        | 15                                  | 35,6                    | 36,7          | 29,3          |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.

Comportamiento de la productividad de los productos triturados en función de las variables operacionales.

| Variables de operación   |                          |                                     | productividad de los productos finales, t/h |             |             |
|--------------------------|--------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------|-------------|-------------|
| Velocidad del rotor, rpm | Cantidad de Martillos, n | Productividad del triturador, (t/h) | Q (3 - 8mm)                                 | Q (1 - 3mm) | Q (1 - 0mm) |
| 1100                     | 2                        | 5                                   | 1,4                                         | 2,0         | 1,3         |
| 1100                     | 2                        | 15                                  | 5,7                                         | 5,3         | 3,4         |
| 1100                     | 4                        | 5                                   | 1,7                                         | 2,0         | 1,1         |
| 1100                     | 4                        | 15                                  | 6,1                                         | 5,0         | 3,2         |
| 1500                     | 2                        | 5                                   | 1,4                                         | 2,0         | 1,4         |
| 1500                     | 2                        | 15                                  | 4,8                                         | 6,3         | 3,7         |
| 1500                     | 4                        | 5                                   | 1,2                                         | 2,1         | 1,5         |
| 1500                     | 4                        | 15                                  | 5,3                                         | 5,5         | 4,4         |

Fuente: Elaboración propia

## Referencias

- [1] Bond, F.C., The third theory of comminution, Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers (193), pp. 484-494, 1952
- [2] Castrillón, R.P., González, A.J. and Quispe, E.C., Energy efficiency improvement in the cement industry by wet process through integral energy management system implementation. DYNA, [Online]. 80 (177), pp 115-123, 2013. Available at: <http://dyna.unalmed.edu.co/ediciones/177/articulos/v80n177a14/v80n177a14.pdf>

- [3] Coello-Velázquez, A.L., Sovershenstvovanie tehnologii izmilchenii lateritobij pud na zabode "Punta Gorda", PhD Thesis, IMS, Saint Petersburg. 1993.
- [4] Coello-Velázquez, A.L., Menéndez-Aguado, J.M., Brown, R., and Rodríguez, B.A., Grindability of lateritic nickel ores in Cuba. *Powder Technology* 182 (1), pp. 113-115, 2008. DOI: 10.1016/j.powtec.2007.05.027
- [5] Coello-Velázquez, A.L., Menéndez-Aguado, J.M., Hechavarria-Pérez J.R. and Rodríguez, B.A., Toward determining the behavior during the impact crushing of minerals. *Minerals and Metallurgical Processing*. 28 (2), pp. 82-87, 2011.
- [6] Da Cunha, E.R., de Carvalho, R.M. and Tavares, L.M., Simulation of solids flow and energy transfer in a vertical shaft impact crusher using DEM, *Minerals Engineering* (43-44), pp. 85-90, 2013. DOI: 10.1016/j.mineng.2012.09.003
- [7] Deniz, V., A study on the specific rate of breakage of cement materials in a laboratory ball mill, *Cement and Concrete Research* (33), pp. 439-445, 2003. DOI: 10.1016/S0008-8846(02)00976-6
- [8] Hechavarria, J.R., Coello-Velázquez, A.L., Menéndez-Aguado, J.M. and Laborde-Brown, R., Aplicación de los modelos de Nikolov en la trituración por impacto del mineral zeolita del yacimiento San Andrés, *Holguín, Revista Minería y Geología*, [Online]. 24 (4), pp. 1-17, 2008. Available at: <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/70>
- [9] Hukki, R.T., Proposal for a solomonic settlement between the theories of von Rittinger, Kick and Bond, *Transactions of the AIME* (223), pp. 403-408, 1962.
- [10] Menéndez-Aguado, J.M., Coello-Velázquez, A.L., Tijonov, O.N. and Rodríguez, M., Implementation of the energy sustainable concept during the comminution process of the Punta Gorda Nickel Plant, *Power Technology* (170), pp. 153-157. 2006. DOI: 10.1016/j.powtec.2006.09.004
- [11] Menendez-Aguado, J.M., Dzioba, B.R. and Coello-Velázquez, A.L., Determination of work index in a common laboratory mill, *Minerals and Metallurgical Processing* 2 (3), pp. 173-176, 2005.
- [12] Morrell, S., An alternative energy-size relationship to that proposed by Bond for the design and optimisation of grinding circuits. *International Journal of Mineral Processing* (74), pp. 133-141, 2003. DOI: 10.1016/j.minpro.2003.10.002
- [13] Mosher, J.B. and Tague C.B., Conduct and precision of bond grindability testing, *Minerals Engineering*, 14 (10), pp. 1187-1197, 2001. DOI: 10.1016/S0892-6875(01)00136-4
- [14] Osorio, A.M., Menéndez-Aguado, J.M., Bustamante, O. and Restrepo, G.M., Fine grinding size distribution analysis using the Swrebec function, *Powder Technology* (258), pp. 206-208. DOI: 10.1016/j.powtec.2014.03.036
- [15] Palacios, L., Natural resources sustainability: Iron ore mining. *DYNA*, [Online]. 78 (170), pp 227-234, 2011. Available at: <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/29507/48796>
- [16] Rodríguez, B.A., Menéndez-Aguado, J.M., Coello-Velázquez, A. and Dzioba, B.R., Transient state analysis by simulation in a closed grinding circuit. *Minerals Engineering* 24 (5), pp.473-475, 2006. DOI: 10.1016/j.mineng.2010.12.005
- [17] Sadrai, S., Meecha, J.A., Ghomshei, M., Sassani F. and Tromans, D., Influence of impact velocity on fragmentation and the energy efficiency of comminution. *International Journal of Impact Engineering* (33), pp. 723-734, 2006. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2006.09.063
- [18] Shi, F. and Kojovic, T., Validation of a model for impact breakage incorporating particle size effect. *International Journal of Mineral Processing* (82), pp. 156-163, 2007. DOI: 10.1016/j.minpro.2006.09.006
- [19] Shi, F., Kojovic, T., Esterle, J.S. and Davida, D., An energy-based model for swing hammer mills, *International Journal of Mineral Processing* (71), pp. 147-166, 2003. DOI: 10.1016/S0301-7516(03)00035-8
- [20] Taggart, A., *Handbook of Mineral Dressing*, Wiley, 1950

**J.R. Hechavarria-Pérez**, received the BSc. Eng. in Mechanical Engineering, MSc. in Mineral Processing and PhD. in Minerals Engineering in the University of Moa, Moa, Cuba. Currently, he is a associate professor in the Faculty of Engineering in the University of Holguín, Holguín, Cuba. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6698-9419>

**A.L. Coello-Velázquez**, received the BSc. and MSc in Mining Engineering in the Donetsk National University, and PhD in Minerals Engineering in the Mining Institute of Saint Petersburg, in 1993. Currently he is a full professor in the University of Moa, Moa, Cuba. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9237-7512>

**F.D. Robles-Proenza**, received the BSc., MSc. and PhD in Mechanical Engineering in the University of Holguín, Holguín, Cuba. Currently he is a full professor in the Faculty of Engineering of the University of Holguín, Holguín, Cuba. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8995-0771>

**J.M. Menendez-Aguado**, received the BSc. MSc and PhD in Mining Engineering in the University of Oviedo, Oviedo, Spain. Currently he is associate professor in the Polytechnic School of Mieres, University of Oviedo, Spain. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6216-6984>



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN  
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería  
Geológica e Ingeniería de Minas y Metalurgia

Oferta de Posgrados

Especialización en Materiales y Procesos  
Maestría en Ingeniería - Materiales y Procesos  
Maestría en Ingeniería - Recursos Minerales  
Doctorado en Ingeniería - Ciencia y Tecnología de  
Materiales

Mayor información:

E-mail: [acgeomina\\_med@unal.edu.co](mailto:acgeomina_med@unal.edu.co)  
Teléfono: (57-4) 425 53 68

# A methodology to obtain an analytical formula for the elastic modulus of lightweight aggregate concrete

Flávio de Souza-Barbosa<sup>a</sup>, Michèle Cristina Resende-Farage<sup>a</sup>, Aldemon Lage-Bonifácio<sup>a</sup>,  
Anne-Lise Beaucour<sup>b</sup> & Sophie Ortola<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brazil. [flavio.barbosa@ufjf.edu.br](mailto:flavio.barbosa@ufjf.edu.br), [michele.farage@ufjf.edu.br](mailto:michele.farage@ufjf.edu.br), [aldemon.bonifacio@engenharia.ufjf.br](mailto:aldemon.bonifacio@engenharia.ufjf.br)

<sup>b</sup> Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil. Université de Cergy-Pointoise, Cergy-Pointoise, France. [anne-lise.beaucour@u-cergy.fr](mailto:anne-lise.beaucour@u-cergy.fr)

<sup>c</sup> Laboratoire Energétique Mécanique Electromagnétisme. Université Paris Ouest Nanterre la Défense, Ville d'Avray, France. [sophie.ortola@u-paris10.fr](mailto:sophie.ortola@u-paris10.fr)

Received: October 14<sup>th</sup>, 2014. Received in revised form: January 26<sup>th</sup>, 2015. Accepted: April 07<sup>th</sup>, 2015

## Abstract

This work proposes a methodology to predict the elastic modulus of lightweight aggregate concretes. To this end an analytical formula is achieved by curve fitting experimental results from 135 concrete samples made of 45 different mixes. The validation of the proposed methodology is carried out by applying the obtained analytical formula to a set of 90 concrete samples made of 30 different mixes. Comparisons with other methods applied to predicting the elastic modulus of lightweight aggregate concretes indicate that the results show good agreement and suggest that the proposed methodology could be applied in practical situations.

**Keywords:** lightweight aggregate concrete; elastic modulus.

# Una metodología para obtener una fórmula analítica para el módulo de elasticidad del hormigón de áridos ligeros

## Resumen

Este trabajo propone una metodología para evaluar el módulo elástico de los hormigones de agregados livianos. Para ello una fórmula analítica se logra mediante el ajuste de la curva de los resultados experimentales de 135 muestras de hormigón hechas de 45 mezclas diferentes. La validación de la metodología propuesta se lleva a cabo mediante la aplicación de la fórmula analítica obtenida a otro conjunto de 90 muestras de hormigón hecha de 30 mezclas diferentes. Las comparaciones con otros métodos utilizados para predecir el módulo de elasticidad de hormigones de agregados livianos muestran que los resultados sean justos y sugieren que la metodología propuesta podría aplicarse en situaciones prácticas.

**Palabras clave:** hormigón de áridos ligeros; módulo elástico.

## 1. Introduction

The structural application of Lightweight Aggregate Concrete (LWAC) is increasing around the world for economic and environmental reasons. The material leads to smaller dead loads, allowing lighter structural members and less amounts of reinforced steel, with no harm to safety. Due to this relatively recent tendency, many works have been dedicated to evaluate the long-term behavior of LWAC [1,2]. Another advantage of this kind of concrete is the fact that its thermal characteristics

are normally attached to high levels of insulation [3].

On the other hand, mechanical properties of LWAC are frequently lower than those of ordinary concrete. For these reason, papers addressing the study of the elastic modulus, for instance, may be easily found in the literature [4-7]. Cui *et al* [5], for example, propose analytical formulas to evaluate LWAC elastic modulus based on a multiple linear regression analysis.

The present work aims to contribute to the practical application of LWAC, by proposing a methodology to

achieve a simple analytical equation to evaluate the elastic modulus ( $E_c$ ) of LWACs made of varied formulations.

It is well known that the elastic modulus plays a paramount role in structural design, since most of the practical applications adopt the theory of elasticity in the material modeling. Thus, it is very convenient for a structural engineer to dispose of a formula that supplies a reliable prevision of the elastic modulus of concrete. To this end a number of codes based on empirical formulas regarding LWAC are available in the literature - in which  $E_c$  is given in terms of two quantities: LWAC's characteristic compressive strength ( $f_{ck}$ ) and oven-dry density of the LWAC ( $\rho_s$ ).

The American Concrete Institute – ACI [8] adopts expression 1:

$$E_c = 0.043 \rho_s^{1.5} f_{ck}^{0.5} \quad (1)$$

The Eurocode 2 (EN 1992-1-1) [9] indicates equation 2:

$$E_c = 22000 (f_{cm}/10)^{0.3} + (\rho_s/2200)^2 \quad (2)$$

Where  $f_{cm}$  (MPa) is the mean value of concrete compressive strength. In Eqs. 1-2,  $E_c$  and  $f_{ck}$  are given in MPa and  $\rho_s$  in kg/m<sup>3</sup>.

Another approach for predicting the elastic modulus of a LWAC consists of expressions in terms of the lightweight aggregate (LWA) properties. For instance, Cui et al [5] suggest the analytical equation presented in Eq. (5), where the LWAC's Young modulus is evaluated as a function of the volumetric fraction of the aggregate ( $V_a$ ); the oven-dried density of the LWA ( $\rho_a$ ) and aggregate shape factor ( $I_s$ ).

$$E_c = -0.267 V_a + 0.005508 \rho_a + 8.096 I_s + 14.221 \quad (3)$$

Where,  $\rho_a$  is given in kg/m<sup>3</sup>;  $V_a$  and  $I_s$  are dimensionless.

It is also possible to predict concrete's mechanical properties by applying computational intelligence technics, such as Artificial Neural Network, Fuzzy Logic or Genetic Algorithms. Those kinds of methods require a set of experimental data in order to calibrate a computational based predictor and another set of laboratory results is applied to validate the quality of the adjusted numerical model. Several works in the literature deal with this strategy in order to predict concrete's mechanical properties [10,11].

The present work proposes an approach in which the evaluation of  $E_c$  is accomplished by using the oven-dry density ( $\rho_a$ ) of the lightweight aggregate (LWA); volumetric fraction

Table 1.  
Summary of Ke's [12] results.

| Concrete # | $V_a$<br>(%) | $\rho_a$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | $E_{c.exp}$<br>(GPa) | $f_{ck}$ (*)<br>(MPa) |
|------------|--------------|----------------------------------|----------------------|-----------------------|
| 1a         | 0.0          | n/a                              | 28.59                | 32.18                 |
| 2a         | 12.5         | 737 A                            | 24.90                | 29.17                 |
| 3a         | 25.0         | 737 A                            | 21.39                | 24.18                 |
| 4a         | 37.5         | 737 A                            | 17.29                | 19.80                 |
| 5a         | 45.0         | 737 A                            | 15.70                | 17.79                 |
| 6a         | 0.0          | n/a                              | 28.59                | 32.18                 |
| 7a         | 12.5         | 921 A                            | 26.16                | 31.03                 |
| 8a         | 25.0         | 921 A                            | 21.68                | 25.99                 |
| 9a         | 37.5         | 921 A                            | 17.90                | 20.63                 |
| 10a        | 45.0         | 921 A                            | 16.61                | 19.79                 |

| Concrete # | $V_a$<br>(%) | $\rho_a$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | $E_{c.exp}$<br>(GPa) | $f_{ck}$ (*)<br>(MPa) |
|------------|--------------|----------------------------------|----------------------|-----------------------|
| 11a        | 0.0          | n/a                              | 28.59                | 32.18                 |
| 12a        | 12.5         | 1577 B                           | 27.37                | 34.31                 |
| 13a        | 25.0         | 1577 B                           | 26.26                | 34.02                 |
| 14a        | 37.5         | 1577 B                           | 25.28                | 35.12                 |
| 15a        | 45.0         | 1577 B                           | 24.32                | 34.63                 |
| 16b        | 0.0          | n/a                              | 33.18                | 56.18                 |
| 17b        | 12.5         | 737 A                            | 27.57                | 37.55                 |
| 18b        | 25.0         | 737 A                            | 23.78                | 28.52                 |
| 19b        | 37.5         | 737 A                            | 20.82                | 21.65                 |
| 20b        | 45.0         | 737 A                            | 18.94                | 22.79                 |
| 21b        | 0.0          | n/a                              | 33.18                | 56.18                 |
| 22b        | 12.5         | 921 A                            | 29.16                | 42.90                 |
| 23b        | 25.0         | 921 A                            | 24.93                | 28.37                 |
| 24b        | 37.5         | 921 A                            | 21.36                | 24.80                 |
| 25b        | 45.0         | 921 A                            | 19.70                | 25.56                 |
| 26b        | 0.0          | n/a                              | 33.18                | 56.18                 |
| 27b        | 12.5         | 1577 B                           | 31.93                | 51.44                 |
| 28b        | 25.0         | 1577 B                           | 30.99                | 49.69                 |
| 29b        | 37.5         | 1577 B                           | 30.15                | 48.20                 |
| 30b        | 45.0         | 1577 B                           | 29.31                | 42.01                 |
| 31c        | 0.0          | n/a                              | 35.40                | 77.96                 |
| 32c        | 12.5         | 737 A                            | 30.22                | 54.84                 |
| 33c        | 25.0         | 737 A                            | 26.03                | 38.41                 |
| 34c        | 37.5         | 737 A                            | 22.30                | 31.39                 |
| 35c        | 45.0         | 737 A                            | 20.08                | 25.95                 |
| 36c        | 0.0          | n/a                              | 35.40                | 77.96                 |
| 37c        | 12.5         | 921 A                            | 32.09                | 56.63                 |
| 38c        | 25.0         | 921 A                            | 27.99                | 42.30                 |
| 39c        | 37.5         | 921 A                            | 23.68                | 30.92                 |
| 40c        | 45.0         | 921 A                            | 21.72                | 31.51                 |
| 41c        | 0.0          | n/a                              | 35.40                | 77.96                 |
| 42c        | 12.5         | 1577 B                           | 34.21                | 73.71                 |
| 43c        | 25.0         | 1577 B                           | 33.85                | 69.95                 |
| 44c        | 37.5         | 1577 B                           | 32.94                | 67.40                 |
| 45c        | 45.0         | 1577 B                           | 33.00                | 65.20                 |
| 46a        | 0.0          | n/a                              | 28.59                | 32.18                 |
| 47a        | 12.5         | 900 B                            | 25.13                | 30.07                 |
| 48a        | 25.0         | 900 B                            | 22.47                | 27.19                 |
| 49a        | 37.5         | 900 B                            | 19.43                | 22.46                 |
| 50a        | 45.0         | 900 B                            | 18.29                | 20.84                 |
| 51a        | 0.0          | n/a                              | 28.59                | 32.18                 |
| 52a        | 12.5         | 927 A                            | 23.54                | 28.46                 |
| 53a        | 25.0         | 927 A                            | 20.67                | 22.81                 |
| 54a        | 37.5         | 927 A                            | 16.74                | 19.16                 |
| 55a        | 45.0         | 927 A                            | 15.67                | 16.91                 |
| 56b        | 0.0          | n/a                              | 33.18                | 56.18                 |
| 57b        | 12.5         | 900 B                            | 29.48                | 47.67                 |
| 58b        | 25.0         | 900 B                            | 26.52                | 42.53                 |
| 59b        | 37.5         | 900 B                            | 22.19                | 33.72                 |
| 60b        | 45.0         | 900 B                            | 20.18                | 30.35                 |
| 61b        | 0.0          | n/a                              | 33.18                | 56.18                 |
| 62b        | 12.5         | 927 A                            | 29.40                | 48.35                 |
| 63b        | 25.0         | 927 A                            | 23.71                | 36.21                 |
| 64b        | 37.5         | 927 A                            | 19.87                | 29.25                 |
| 65b        | 45.0         | 927 A                            | 17.18                | 25.15                 |
| 66c        | 0.0          | n/a                              | 35.40                | 77.96                 |
| 67c        | 12.5         | 900 B                            | 32.78                | 62.72                 |
| 68c        | 25.0         | 900 B                            | 28.00                | 51.48                 |
| 69c        | 37.5         | 900 B                            | 24.34                | 39.59                 |
| 70c        | 45.0         | 900 B                            | 22.02                | 34.27                 |
| 71c        | 0.0          | n/a                              | 35.40                | 77.96                 |
| 72c        | 12.5         | 927 A                            | 31.15                | 62.23                 |
| 73c        | 25.0         | 927 A                            | 26.75                | 47.62                 |
| 74c        | 37.5         | 927 A                            | 22.43                | 37.15                 |
| 75c        | 45.0         | 927 A                            | 20.35                | 34.44                 |

n/a: non applicable

(\*) Ke [12] presents mean values for compressive strength ( $f_m$ ).  $f_{ck}$  was calculated by applying the Eurocode equation:  $f_{ck} = f_m - 8$  MPa.

Source: Adapted from Ke[12]

of the aggregate ( $V_a$ ); and the Young modulus of the mortar ( $E_M$ ). The main advantage of the proposed methodology, when compared with Eqs. 1 and 2, is the fact that it does not demand previous knowledge of the concrete's compressive strength. Once the mortar elastic modulus is obtained, even for a different kind and/or amount of aggregate in the concrete, the proposed methodology is able to fairly predict  $E_c$ .

## 2. Proposed methodology

In order to predict  $E_c$ , the basic function presented in Eq. 5 was taken as a starting point, based on the parameters to be adjusted according to the experimental database:

$$E_c = E_M \Gamma(\lambda) \quad (4)$$

Where  $E_M$  is the elastic modulus of the mortar, standing for its influence on  $E_c$ , and  $\Gamma(\lambda)$  represents the contribution of LWA for the  $E_c$ , where  $\lambda = [(\rho_a/1000)/V_a]$ .

Admitting that the mortar has an elastic modulus equal or superior to the LWA's, the maximum value of  $E_c$  should be  $E_M$  and  $\Gamma(\lambda) \leq 1$ . The next step is to identify the function  $\Gamma(\lambda)$ . To this end, a set of experimental results, presented by Ke[M1] [12] in his PhD thesis, was used. Three kinds of mortar for five different types of LWA and five levels for the amount of concrete, resulting in 75 different mixes were tested. For each mix, three samples were tested, leading to 225 samples, and the mean values were named as  $E_c$ . Tab. 1 summarizes Ke's [12] results. In this table only the mean values for  $E_c$  (column  $E_{c,exp}$  in Table 1) are presented and  $f_{ck}$  is omitted. The concrete number (column # in Table 1) is followed by a letter (a, b or c) indicating the respective mortar. Two kinds of LWA were tested: expanded clay and shale. The oven-dry density (column  $\rho_s$  in Table 1) is followed by the aggregate type: "A" for expanded clay and "B" for expanded shale. The shape factor ( $I_s$ ) for clay and shale are, respectively, 1.240 and 1.873.

Concretes from #1a to #45c were used to investigate function  $\Gamma(\lambda)$ . Figs 1 to 3 show a comparison between experimental results and  $E_c$  obtained with Eq. 5, considering  $\Gamma(\lambda)$  as described in Eq. 6:

$$\Gamma(\lambda) = [1 + \exp(-\alpha \lambda)]^{-1} \quad (5)$$

Where  $\alpha = 30.82 \text{ m}^3/\text{kg}$ .

The parameter  $\alpha$  is achieved by curve fitting Eq. 5, with  $\Gamma(\lambda)$  showed in Eq. 6, for each analyzed mortar, resulting in three  $\alpha$  parameters. The adopted value for  $\alpha$  is the mean of them. The applied methodology for curve fitting was the mean square method.

## 3. Validation of the proposed methodology

By applying the achieved expression for  $E_c$  to the concretes from #46a to #75c the validation of the proposed methodology is carried out. Fig. 4 presents a comparison between the experimental results for  $E_c$  and the predicted counterparts.

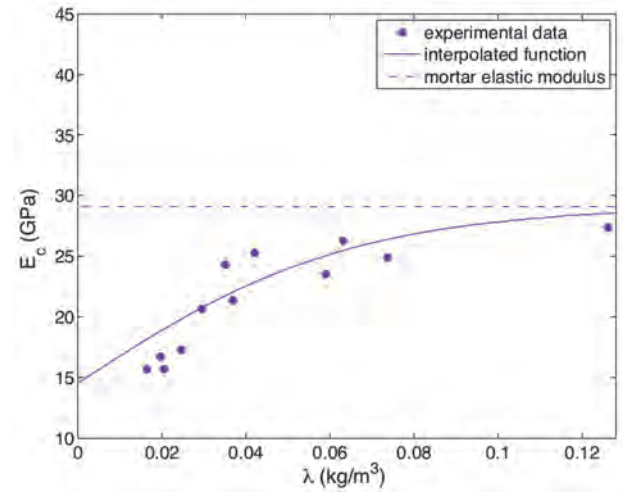


Figure 1. Analysis of  $E_c$  for mortar a.

Source: The authors

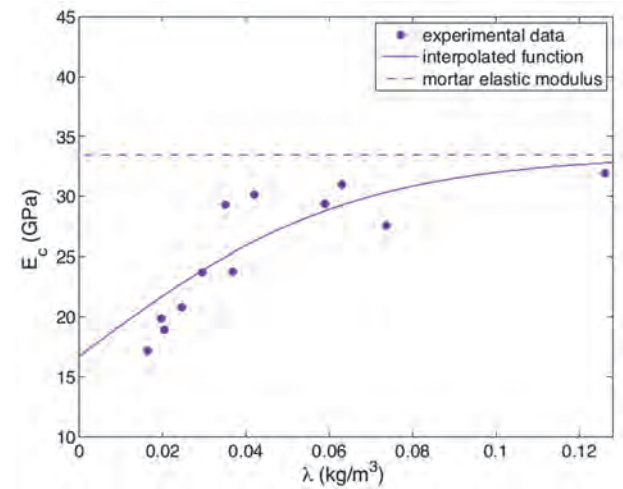


Figure 2. Analysis of  $E_c$  for mortar b.

Source: The authors

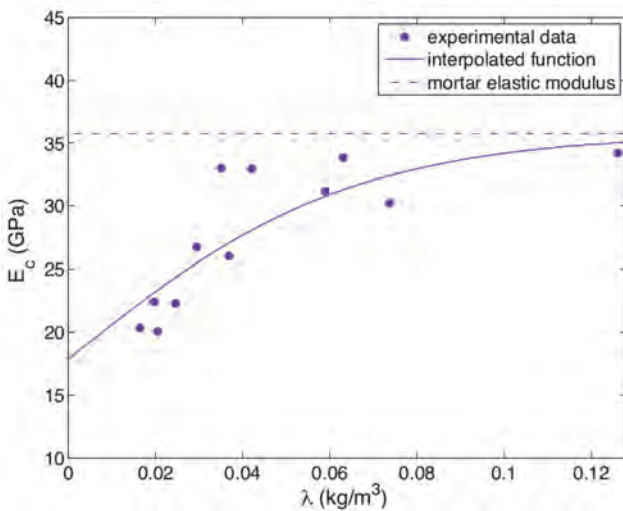


Figure 3. Analysis of  $E_c$  for mortar c.

Source: The authors

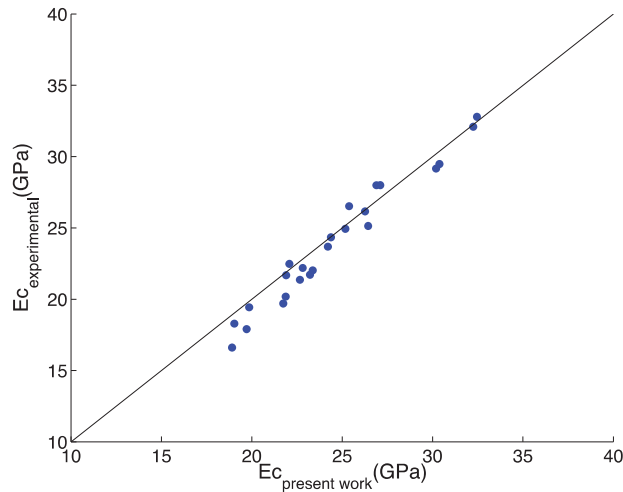


Figure 4. Comparison between experimental results and predictions for  $E_c$ .  
Source: The authors

It is possible to observe in Fig. 4 that the proposed methodology allows a good prediction for  $E_c$ .

#### 4. Comparisons with available expressions

The performance of the proposed formula was assessed by comparing its results to those obtained from expressions available in the literature (Eqs. 1 and 2).

For comparison purposes, a multilayer perceptron artificial neural network was adopted, which is a technique applied to several kind of problems [13]. The network adopted herein has one hidden layer and eight neurons in the hidden layer. Concretes from #1 to #45 were used for the network training.

The performance of each predictor can be better observed in Figs. 5-9. In order to avoid distorted results in favor of the presented methodology, only the concretes used in the validation process were considered in these figures. For the

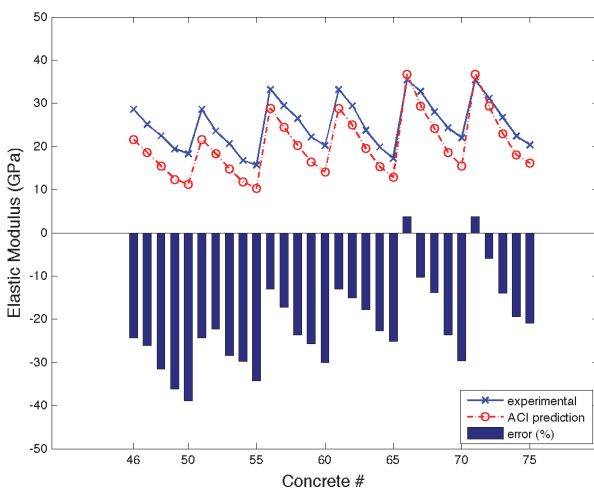


Figure 5. Evaluation of ACI [8] predictions for  $E_c$ .  
Source: The authors

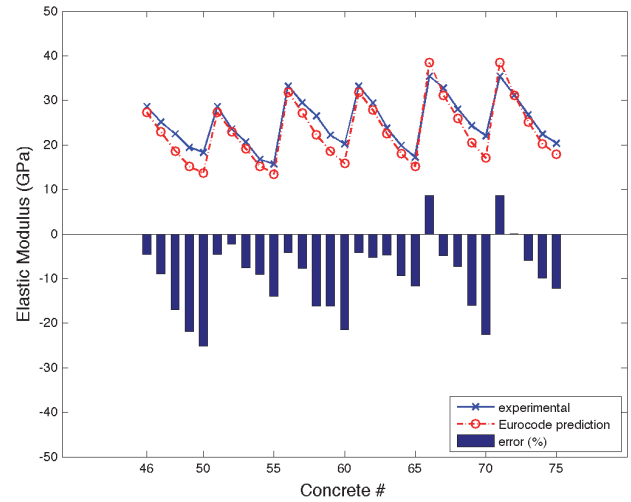


Figure 6. Evaluation of Eurocode [9] predictions for  $E_c$ .  
Source: The authors

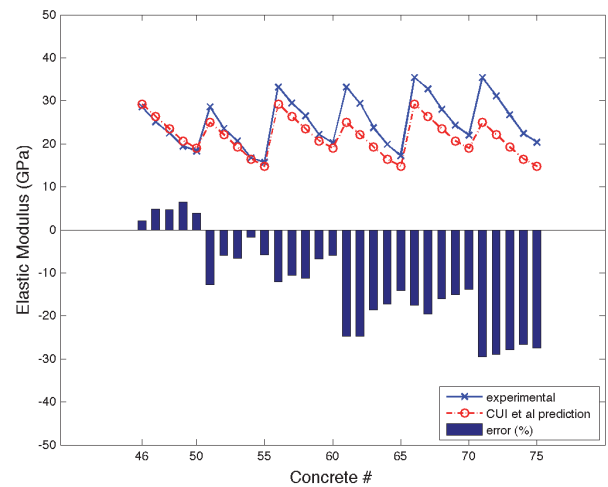


Figure 7. Evaluation of Cui et al [5] predictions for  $E_c$ .  
Source: The authors

proposed methodology, the neural network, and Cui *et al* [5] results, the predictions for  $E_c$  were multiplied by 0.85 aiming to consider a safety design parameter. This value was arbitrarily chosen and it tries to assure that practically all predictions for  $E_c$  are inferior to the experimental counterparts. For ACI and Eurocode, safety design coefficients are implicitly included in the respective Eqs. 1 and 2.

It is possible to observe from Figs. 5-9 that all formulations give conservative predictions for  $E_c$  for practically all concretes. Only a limited number of concretes had estimations for  $E_c$  slightly superior than the experimental counterparts.

The results of the overall comparison are calculated in Table 2.

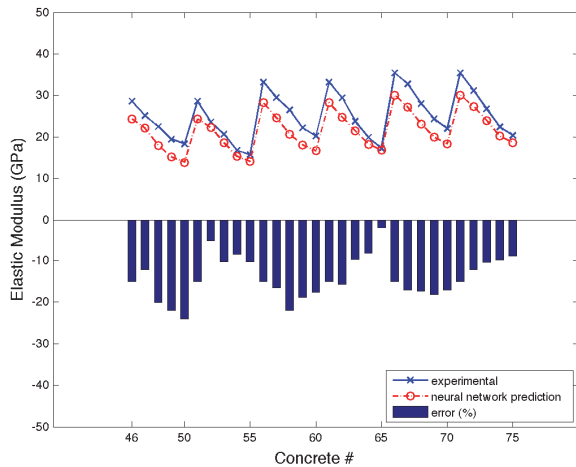


Figure 8. Evaluation of Neural Network predictions for  $E_c$ .  
Source: The authors

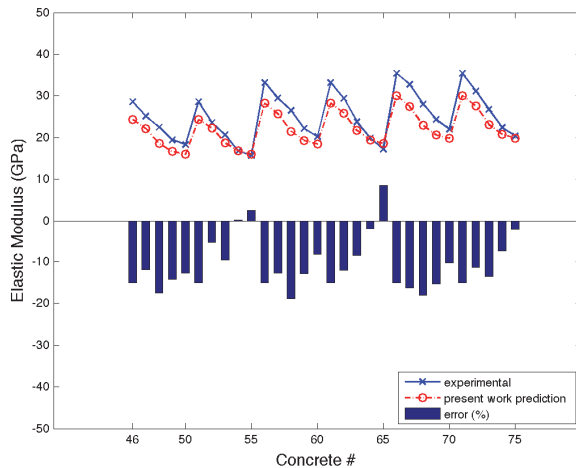


Figure 9. Evaluation of the present work predictions for  $E_c$ .  
Source: The authors

Table 2:  
Comparisons with available expressions

| Reference      | maximum absolute error (%) | mean absolute error (%) | standard deviation of the error (%) |
|----------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| ACI [8]        | 38.88                      | 21.48                   | 10.32                               |
| Eurocode [9]   | 25.19                      | 10.40                   | 8.15                                |
| Cui et al [5]  | 29.47                      | 14.11                   | 10.88                               |
| Neural network | 24.03                      | 14.11                   | 5.10                                |
| Present work   | 18.90                      | 11.42                   | 6.52                                |

Source: The authors

From Table 2 and Figs. 5-9 one can observe that:

- ACI [8] results are the most conservative. Moreover, one verifies that the ACI method allows the greatest maximum and mean absolute errors;
- CUI *et al* [5] results allow the second biggest maximum absolute error and the greatest standard deviation;

Table 3:  
Performance of the three best predictors

| Rank | Maximum absolute error (%) | Mean absolute error (%) | Standard deviation of the error (%) |
|------|----------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| #1   | Present work               | Eurocode                | Neural Network                      |
| #2   | Neural Network             | Present work            | Present work                        |
| #3   | Eurocode                   | Neural Network          | Eurocode                            |

Source: The authors

- Eurocode, neural network and the present work have good performances amongst the studied criteria. These methods were considered as the best predictors for  $E_c$ .

Table 3 aims to rank the three best predictors:

Considering Tables 2 and 3, it is possible to conclude that, for the set of studied concretes, Eurocode, neural network and the present work present fair results for the prediction of  $E_c$ . Moreover, in view of the fact that the present work has the best performance in terms of maximum absolute error and the second best performance for the other two criteria, it is possible to consider that the fair results achieved by applying the proposed methodology are slightly better than the other methods.

## 5. Conclusions

The present work deals with an analytical expression to evaluate the elastic modulus of Lightweight Aggregate concretes, aimed towards practical applications by design engineers. The main feature of the proposed formula is the fact that the input parameters are: mortar Young's modulus, instead of concrete compressive strength; aggregate's density and amount of aggregate. The principal advantage of the proposed methodology is to avoid laboratory tests to determine concrete compressive strength for any prediction of  $E_c$ . Once the Young's modulus of the mortar is obtained, the estimation of  $E_c$  may be fairly achieved without further laboratory tests, even for different kinds or/and amounts of aggregates. The results for the set of analyzed concretes are considered as fair and the performance, when compared to other formulas, was slightly superior to Eurocode and neural network, and clearly superior to the other evaluated formulations.

Finally, It is important to observe that this article proposes a methodology and not an expression for the estimation of  $E_c$ . The results were achieved by analyzing two kinds of LWAs. A general formula demands more laboratory tests considering a large number of LWA types. Despite this, the proposed methodology could be applied for other kinds of aggregates, by adjusting  $\alpha$  parameter for each LWA type. In the present work, the results were considered as fair for LWACs made by expanded clay and expanded shale, using the same adjusted  $\alpha$  parameter. A separate analysis for each LWA would be less generic but more accurate.

## Acknowledgements:

The authors would like to thank FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais), CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e

Tecnológico) and CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) for financial support.

## References

- [1] Youm, K.S., Jeong Y.J., Han E.S.H. and Yun, T.S., Experimental investigation on annual changes in mechanical properties of structural concretes with various types of lightweight aggregates. *Construction and Building Materials*, 73, pp. 442-451, 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.044
- [2] Bogas, J.A. and Cabaço, J.B., Long-term behaviour of concrete produced with recycled lightweight expanded clay aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 65, pp. 470-479, 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.003
- [3] Nguyen, L.H., Beaucour, A.-L., Ortola, S. and Noumowé, A., Influence of the volume fraction and the nature of fine lightweight aggregates on the thermal and mechanical properties of structural concrete. *Construction and Building Materials*, 51, pp. 121-132, 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.019
- [4] Ke, Y., Beaucour, A.L., Ortola, S., Dumontet, H. and Cabrillac, R., Influence of volume fraction and characteristics of lightweight aggregates on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 23, pp. 2821-2828, 2009. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.02.038
- [5] Cui, H.Z., Lo T.Y., Memon, S.A., Xing, F. and Shi, X., Analytical model for compressive strength, elastic modulus and peak strain of structural lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 36, pp. 1036-1043, 2012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.041. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.034
- [6] Zhang, M.H. and Gjorv, O., E. Mechanical properties of high-strength lightweight concrete. *ACI Materials Journal*, 88, pp. 240-247, 1991.
- [7] Slate, F.O., Nilson, A.H. and Martinez, S., Mechanical properties of high-strength lightweight concrete. *ACI Journal, Proceedings*, 88, pp. 606-613, 1986.
- [8] ACI 213R-03 - Guide for structural lightweight-aggregate concrete. American Concrete Institute standard, 2003.
- [9] Eurocode. Design of concrete structures (EN 1992-1-1). 1992.
- [10] Bilgehan, M., A comparative study for the concrete compressive strength estimation using neural network and neuro-fuzzy modelling approaches. *Nondestruct Test Eva*, 26, pp. 35-55, 2011. DOI: 10.1080/10589751003770100
- [11] Yuan, Z., Wang, L.-N. and Ji, X., Prediction of concrete compressive strength: Research on hybrid models genetic based algorithms and ANFIS. *Advances in Engineering Software*, 67, pp. 156-163, 2014. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2013.09.004
- [12] Ke, Y., Characterization of the mechanical behavior of lightweight aggregate concretes: Experiment and modelling, PhD. Thesis, Université de Cergy- Pontoise, 2008.
- [13] Velasquez, H., Juan, D., Montoya, M. y Santiago, F., Modelado del índice de precios al consumidor usando um modelo hibrido basado en redes neuronales artificiales, *DYNA rev.fac.minas*, 72, pp.85-93, 2005.

**F. de Souza-Barbosa**, is an associate professor and research engineer at the Federal University of Juiz de Fora - UFJF, Brazil. He received his BSc. from UFJF, Brazil in 1994, MSc from Federal University of Rio de Janeiro – UFRJ, Brazil in 1996 and PhD. from UFRJ, Brazil, in 2000. He is member of the Editorial Board of the IABSE Journal – Structural Engineering International (SEI). His research interests include structural dynamics, concrete structures and computational modeling of structures.

**M. C. Resende-Farage**, is an associate professor and research engineer at the Federal University of Juiz de Fora - UFJF, Brazil. She received her BS from UFJF in 1991, M.Sc from Federal University of Rio de Janeiro – UFRJ in 1995 and Ph.D. from UFRJ in 2000. Her research interests include experimental analysis and computational modeling of concrete structures.

**A. Lage-Bonifácio**, is Ph.D. student in the graduation program in computational modeling in the Federal University of Juiz de Fora - UFJF, Brazil.

**A.-L. Beaucour**, is an associate professor at the University of Cergy-Pontoise, France. She graduated from the National School of Geology (ENSG) in 1993 and received her PhD in civil engineering from INSA de Lyon in 1997. Her research activities concern sustainable construction and high temperature behavior of concretes.

**S. Ortola**, is a lecturer at Paris Ouest Nanterre la Défense University, France. She received her BSc, MSc and PhD. in mechanics from Université Pierre & Marie Curie (UPMC, Paris6, France) in 1988, 1989 and 1992. Her research interests focus on modeling and numerical simulation of the behaviors of heterogeneous materials and structures. Applications concern constructions and building materials such as lightweight aggregate concrete or polymer mortar, subjected to thermo-mechanical solicitations.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN  
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería Civil

Oferta de Posgrados

Especialización en Vías y Transportes  
Especialización en Estructuras  
Maestría en Ingeniería - Infraestructura y Sistemas  
de Transporte  
Maestría en Ingeniería – Geotecnia  
Doctorado en Ingeniería - Ingeniería Civil

Mayor información:

E-mail: asisacac\_med@unal.edu.co  
Teléfono: (57-4) 425 5172

# Wear resistance of vanadium-niobium carbide layers grown via TRD

Fabio Enrique Castillejo-Nieto <sup>a</sup>, Jhon Jairo Olaya-Florez <sup>b</sup> & José Edgar Alfonso <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Santo Tomas de Aquino, Bogotá, Colombia. [fabiocastillejo@usantotomas.edu.co](mailto:fabiocastillejo@usantotomas.edu.co)

<sup>b</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. [jjolayaf@unal.edu.co](mailto:jjolayaf@unal.edu.co)

<sup>c</sup> Grupo de Ciencia de Materiales y Superficies, Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. [jealfonsoo@unal.edu.co](mailto:jealfonsoo@unal.edu.co)

Received: July 05<sup>th</sup>, 2014. Received in revised form: April 5<sup>th</sup>, 2015. Accepted: July 27<sup>th</sup>, 2015.

## Abstract

Nb-V complex carbide coatings were produced on AISI D2 steel substrates using the thermo-reactive diffusion (TRD) process in order to improve the surface hardness and wear resistance of this tool steel. The carbide coating treatment was performed using molten borax with added ferroniobium, ferrovanadium, and aluminum at temperatures of 1223, 1293, and 1363 K for 2, 3, 4, and 5 h. The coating layers were characterized with scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS). The growth rates of the coatings were studied, and a kinetic model of the layer thickness was constructed as a function of the time and temperature treatment. The hardness and friction coefficient (COF) of the coatings was measured through nanoindentation and pin on disk test respectively. The carbide layers had a homogeneous thickness and a hardness of 37.63 GPa, which is close to values obtained in super-hard materials, and the COF was in the range of 0,3 for the coated steels.

**Keywords:** Thermo Reactive Diffusion, Niobium-Vanadium Carbide, Hardness, wear

# Resistencia al desgaste de capas de carburo de vanadio-niobio crecidas por medio de TRD

## Resumen

Recubrimientos mixtos de carburos de niobio - vanadio se fabricaron utilizando el proceso de difusión termo-reactiva (TRD) a fin de mejorar la resistencia al desgaste en aceros para herramientas. Los recubrimientos fueron depositados en un baño de bórax con ferroniobio, ferrovanadio y aluminio, con temperaturas de depósito de 1223, 1293 y 1363 K para 2, 3, 4 y 5 h. Los recubrimientos producidos se caracterizaron con microscopía electrónica de barrido (SEM), difracción de rayos X (DRX) y espectroscopia de dispersión de energía (EDS). Se estudiaron las tasas de crecimiento de los recubrimientos, y se construyó un modelo de la cinética del espesor de la capa como una función del tiempo y la temperatura del proceso. La dureza y el coeficiente de fricción (COF) de los recubrimientos se midieron a través de nanoindentación y bola sobre disco, respectivamente. Las capas de carburo presentaron un espesor homogéneo alcanzando durezas de 37,63 GPa que está cerca de valores obtenidos en materiales súper-duros, y el COF presento valores cercanos de 0,3 para los aceros recubiertos.

**Palabras clave:** Difusión Termo-Reactiva, Carburo de Niobio-Vanadio, dureza, desgaste.

## 1. Introduction

Various surface treatments are used to produce coatings, mainly of carbides and nitrides of transition metals, in order to improve the tribological performance of materials that are subjected to conditions of high wear, such as forming dies and cutting tools such as drills and chisels in the

metalworking sector. These coatings are generally produced using techniques such as physical vapor phase deposition (PVD) and chemical deposition in the vapor phase (CVD) [1,2]. These procedures require the use of complex equipment and high-vacuum conditions, which makes their industrial implementation costly. An affordable and competitive alternative has been the application of hard

coatings with excellent wear resistance through deposition via the thermo reactive diffusion (TRD) process [3] on substrates containing a carbon percentage higher than 0.3% w [4]. The coatings deposited through this process exhibit good adhesion to the substrate, good thickness uniformity, low friction coefficients, and a high degree of hardness. [5]. In the TRD process, a bath of molten salts formed by borax, aluminum as a reducing element, and carbide forming elements (CFE's) such as titanium, niobium, chromium, and vanadium can be used [4]. The carbide is formed when the metal element dissolved in the salt bath has a relatively low energy of formation of carbide and an energy of formation of the oxide higher than that of boron oxide (B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) [6,7]. If this condition is not fulfilled, the boron atoms are not oxidized and are free to diffuse in the steel, where they combine with the iron to form layers of iron boride (FeB or Fe<sub>2</sub>B) [8,9].

The research reported to date has studied binary metal carbides deposited via the TRD process, and has characterized its wear resistance, microstructure, and mechanical behavior. For example, several studies have focused on producing VC and NbC coatings on substrates of AISI H13, AISI M2, and AISI D2 steel, reporting hardness values of up to 2300 HV [3,5]. Other investigations have studied the growth kinetics of niobium carbides on AISI 1040 [10], iron boride on AISI 4140 steel [11], and chromium carbide on AISI D2 steel [12]. These papers reported the growth kinetics for binary systems such as NbC or VC, obtaining a layer thickness that depended on the time and the temperature of the treatment. Regarding electrochemical behavior, there are studies of iron boride and aluminum formed using borax on steels AISI S1, S2, and S3, varying the manganese content [13] and there are also studies about tribological and electrochemical performance of niobium-chromium carbides [14]. However, there are few microstructural and electrochemical studies of possible ternary systems produced using two EFC's. Therefore, the aim of this work is to deposit ternary niobium-vanadium carbide coatings on a D2 steel substrate using the thermo reactive deposition technique and to study their structure, hardness, and wear resistance.

## 2. Experimental Methods

Coatings of ternary carbides were deposited on AISI D2 tool steel. The dimensions of the substrate were 15 mm in diameter and 4 mm in thickness. The preparation of the samples was performed through metallographic polishing with 220, 360, 400, 600, 1000, and 1200 sandpaper, ending with an ultrasonic cleaning in acetone. The chemical composition of the steel, as stated by the manufacturer, was 1.5% wt C, 11.5-12.5% wt Cr, 0.15-0.45% wt Mn, 0.8% wt Mo, 0.8 wt% V and Fe balance. The steel samples were supplied in the annealed condition with a maximum hardness of 2.6 GPa.

The coatings were produced using a salt bath formed by molten borax (Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>), 8% wt ferro-niobium (Fe-Nb), 8% wt ferro-vanadium (Fe-V) and 3% wt aluminum (Al). The aluminum that is added in the salt bath had the role of a reducing agent, i.e., it reduced boron oxide and oxidized it in order to prevent the added metal (niobium or vanadium) from

oxidizing so that these metals are released and can bind with the carbon of the steel to form carbides. The growth rates of the coatings were studied through surface treatment with TRD at three different temperatures of 1223, 1293, and 1363 K for 2, 3, 4, and 5 hours, with preheating at 873 K.

The crystallographic structure of the coatings was analyzed using an X-PertPro Panalytical diffractometer operating at 45 kV and 40 mA, with a configuration of  $\theta$  - 2 $\theta$  at an interval of 30° to 90° and steps of 0.02°, with the K $\alpha$  line of copper (1.594 Å). The average thickness of the coatings was measured with a Philips scanning electron microscope, working at 40 KV and the EDX was used to determine the chemical composition of the coatings surfaces. The wear cracks were observed using the confocal microscopy. The hardness and the elastic modulus of the coatings were determined from measurements of nano-indentation using CSM Instruments equipment, with a Berkovich indenter at a speed of approach to the sample of 2000 nm/min with a load application rate of 10 mN/min and a maximum load of 30 mN every 15 s. The results obtained were results from an average of 6 measurements. The tribological properties of the coatings were measured at room temperature, via a CETR-UMC-2 tribometer, using the ball-on-disk technique with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> balls of 6 mm diameter and applying a load of 4 N at a speed of 50mm/s for 10 minutes with a humidity of 60%.

## 3. Results and Discussion

### 3.1. Microstructure and growth kinetics of the coatings

Fig. 1 shows the cross section (SEM) of two coatings of vanadium-niobium obtained at temperatures of 1363 and 1223 K for a deposit time of 5h for both coatings. The images allow it to be established that the coatings have thicknesses of  $19.3 \pm 3.2 \mu\text{m}$  and  $9.6 \pm 0.8 \mu\text{m}$ , respectively. Higher values of thickness were obtained at the higher temperature. Furthermore, the micrograph allows it to be seen that coatings were formed by splats with dimensions on the order of a micron.

Fig. 2 shows the coating thickness as a function of time, with the temperature as a study parameter. Fig. 2a shows that the thickness does not exhibit linear behavior with respect to the time of thermal treatment. Therefore, it can be assumed that the rate of diffusion of carbon in the layer determines the growth rate of the coatings [15], and if the layer growth is perpendicular to the substrate surface, we can assume that the film growth rate obeys an Arrhenius function (see eq. 1) [10]. From Fig. 2b, the coefficient of diffusion of carbon into the substrate was determined.

$$x^2 = Dt \quad (1)$$

Where  $x$  is the thickness (cm),  $D$  is the diffusion coefficient (cm<sup>2</sup>/s) and  $t$  is the processing time (s). Given that the carbon that diffuses also reacts to form carbides, the diffusion coefficient calculated using Eq. (1) is an effective diffusion coefficient and, therefore, it does not correspond to pure diffusion of carbon in the substrate.

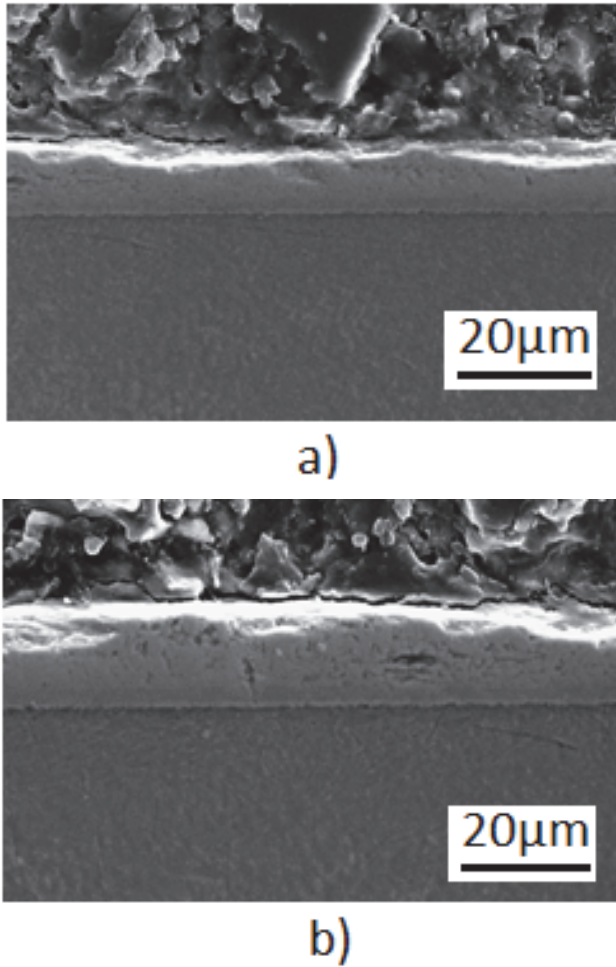


Figure 1. SEM images of a) Niobium-Vanadium carbide at 1223 K and 5 h. y b) Niobium-Vanadium carbide at 1363 K and 5 h.  
Source: The authors

The relationship between diffusion coefficient and temperatures is given by [10]:

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (2)$$

Where  $D_0$  is the frequency factor,  $Q$  is the activation energy,  $R$  the gas constant and  $T$  is the absolute temperature. Linearizing this function, one obtains:

$$\ln D = \frac{-Q}{RT} + \ln D_0 \quad (3)$$

Fig. 3 shows the behavior of  $\ln D$  as a function of the reciprocal of the temperature. In the inset, we show the values of the slope and the intercept, which allow determining that the activation energy  $Q = 137.688$  kJ/mol (Ec. 3) and the value of  $D_0$  is  $3.88 \times 10^{-5}$ . Substituting these numerical values into Equation 1, Equation 4 is obtained.

$$D = 3736 \sqrt{t \exp\left(\frac{16651}{T}\right)} \quad (4)$$

This expression allows calculating the thickness ( $t$ ) of the coating in microns. In Table 1, the measured and calculated thickness values are shown.

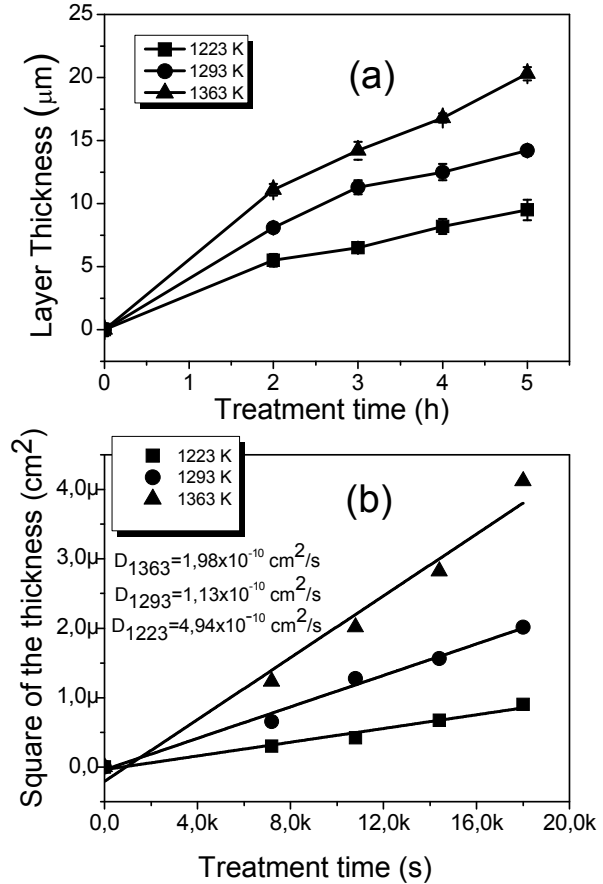


Figure 2. (Up) Thickness of the coatings and, (down) square of the thickness, as a function of treatment time.  
Source: The authors

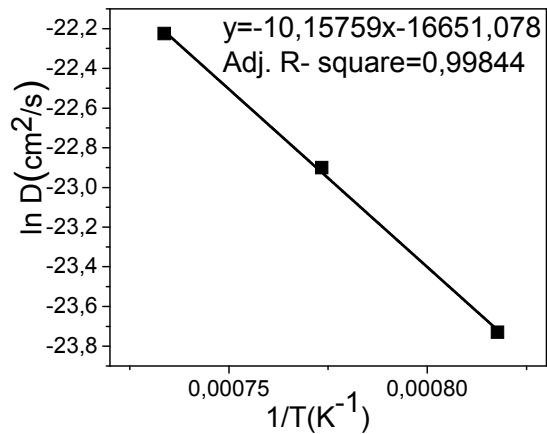


Figure 3. Natural logarithm of  $D$  as a function of the inverse of the temperature.  
Source: The authors

Table 1.

Measured and computed thickness for NbVC<sub>2</sub>, obtained through TRD at different times and temperatures.

| NbV on D2 | 1223K          |                |        | 1293K          |                |        | 1363K          |                |        |
|-----------|----------------|----------------|--------|----------------|----------------|--------|----------------|----------------|--------|
|           | Measured       | Calculated     | Error% | Measured       | Calculated     | Error% | Measured       | Calculated     | Error% |
|           | Thickness (μm) | Thickness (μm) |        | Thickness (μm) | Thickness (μm) |        | Thickness (μm) | Thickness (μm) |        |
| Time(h)   |                |                |        |                |                |        |                |                |        |
| 0         | 0              | 0              | 0      | 0              | 0              | 0      | 0              | 0              | 0      |
| 2         | 5.5            | 5.8            | 5.1    | 8.1            | 8.4            | 3.5    | 11.1           | 11.8           | 5.9    |
| 3         | 6.5            | 7.1            | 8.4    | 11.3           | 10.3           | 9.7    | 14.2           | 14.4           | 1.3    |
| 4         | 8.2            | 8.3            | 1.2    | 12.5           | 11.9           | 5      | 16.8           | 16.6           | 1.2    |
| 5         | 9.5            | 9.2            | 3.2    | 14.2           | 13.3           | 6.7    | 19.7           | 18.6           | 5.9    |

Source: The authors

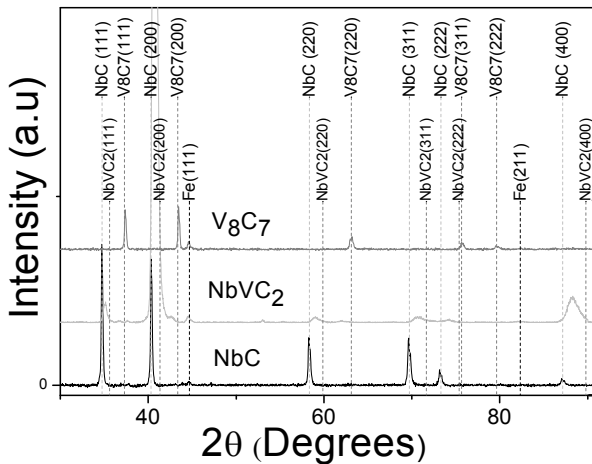


Figure 4. XRD patterns for niobium-vanadium carbides deposited on AISI D2 steel.

Source: The authors

Fig. 4 shows the XRD patterns of the coatings of the ternary vanadium-niobium carbides, obtained at a temperature of 1263 K and a time of 4 h of heat treatment. In order to establish the difference between the crystallographic phases in NbC and VC binary coatings [16] and in the ternary system, the three systems are included in the figure. Comparing XRD patterns allows establishing that the ternary vanadium-niobium carbides exhibit only the NbC crystallographic phase [17]. This result can be explained by considering that the free energy of the formation of NbC (-33.6 kcal) [18] is less than the free energy of formation of VC (-24 kJ/mol) [18].

Moreover, peaks with lower intensities present in the XRD pattern of the ternary system were assigned to the NbVC<sub>2</sub> phase. The angular positions and the corresponding planes are shown in Table 2. The theoretical value was calculated with Powder Cell 2.4 software, in which values of the NbVC<sub>2</sub> crystallographic system were provided, such as the space group, the group number, and the Wyckoff parameters of this compound [19].

### 3.2. Chemical composition and mechanical properties

Table 3 shows the atomic percent measured through EDS analysis for every coating. The result shows that there is a

Table 2.

Calculated and experimental angles of ternary carbides.

| Plane | NbVC <sub>2</sub> |              |
|-------|-------------------|--------------|
|       | Calculated        | Experimental |
| Hkl   | 2θ                |              |
| 200   | 41.335            | 40.96        |
| 220   | 59.886            | 59.91        |
| 311   | 71.647            | 71.88        |
| 222   | 75.369            | 74.98        |
| 400   | 89.802            | 89.02        |
| 331   | 100.568           | 100.12       |

Source: The authors

Table 3.

EDS results for the binary and ternary carbide coatings.

| System                        | % at Nb | % at V | % at Fe | % at O | % at C |
|-------------------------------|---------|--------|---------|--------|--------|
| NbC                           | 31,1    | --     | 7.2     | 18,6   | 43,1   |
| NbVC <sub>2</sub>             | 37.2    | 18.7   | 5.3     | 6,2    | 32,6   |
| V <sub>8</sub> C <sub>7</sub> | --      | 40,4   | 9.6     | 18,4   | 31,6   |

Source: The authors

greater percent of niobium than vanadium in the carbides; this can be explained based on the low formation energy of this carbide in comparison with the vanadium carbide.

Table 4 shows the values of hardness and elastic modulus of the coatings. Overall, the results show that coatings with ternary carbides increase their hardness value.

This increase in hardness may be associated with two factors: i) the crystal size reduction forming the coating, which is evidenced by the increased FWHM (Full Width at Half Maximum) of the peaks in the XRD, and ii) the macro-deformation, which is evidenced by the shift of the peaks with respect to their position in a binary carbide sample (see Fig. 4) [20-22]. The values of the hardness of the ternary coatings are close to those of the super-hard materials. [23].

Table 4.

Hardness and elastic modulus of the coatings of vanadium and niobium carbides deposited on AISI D2 steel.

| System                        | Hardness (Gpa) | Elastic modulus (Gpa) |
|-------------------------------|----------------|-----------------------|
| NbC                           | 24.72 ± 1,4    | 420.6 ± 16,2          |
| V <sub>8</sub> C <sub>7</sub> | 25.46 ± 1,1    | 384.8 ± 14,8          |
| NbVC <sub>2</sub>             | 37.63 ± 1,7    | 435.1 ± 22,4          |

Source: The authors

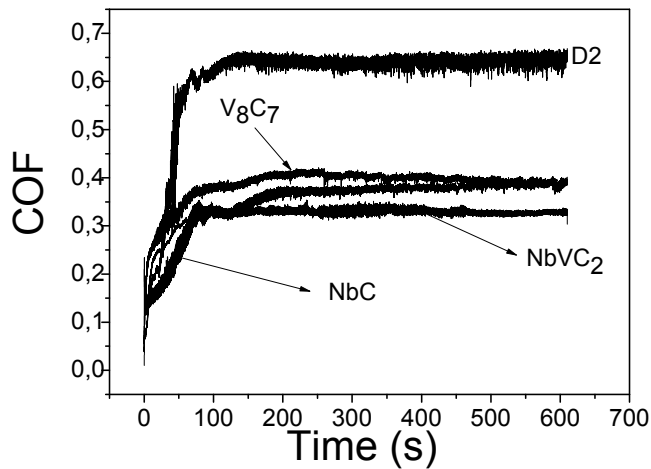


Figure 5. Friction coefficients in carbide coatings deposited on D2 steel obtained through the ball-on-disk test.  
Source: The authors

### 3.3. Coefficient of friction

Fig. 5 shows the curve of the coefficient of friction as a function of the duration of wear testing for binary and ternary carbides systems deposited on AISI D2 steel. From the figure it can be established that the coefficient of friction (COF) of the binary carbides is less by about a factor two compared to the COF substrate. These results agree with those obtained in other studies [24-26]. In the ternary carbide systems, the COF values exhibit little change as a function of the percentage of vanadium, the coating with less vanadium having a lower COF value. The decrease of the COF in the coatings can be explained considering that on their surface there is an excess of aliphatic carbon atoms and graphite, which have Van der Waals type bonds. Calculation of the wear was not carried out because the depth of the wear scar was comparable to the roughness of the coating.

Figs. 6a to 6c show the EDS analysis, the morphology, and an image of confocal laser microscopy, respectively, of the NbC coatings. The EDS analysis shows signals of lines energy of Nb, Fe belonging to the substrate, and C. The SEM micrograph shows the plastic deformation of the coating, and the confocal image shows areas of maximum and minimum height of the coating and the line along which the roughness calculation was made. In Figs. 6d to 6f, we show the same information, but for vanadium carbide. The EDS analysis shows the presence of the K line of V, K line of Fe from the substrate, and K line of Al, possibly present in the salt bath. The confocal image allows the delamination of this carbide (dark green areas) to be observed, which appears mainly on the wear track.

Fig. 7 shows a SEM image for a wear track of NbVC<sub>2</sub> carbide deposited on AISI D2 steel. The cracking and delamination of the deposited carbide and the grooves or channels on the worn area is shown. The wear mechanism is based on the formation of cracks and parallel channels during the wear test. According to Adachi and Hutchings, this situation is known as a slotted wear, or an abrasion of two bodies [27]. These slots arise as a result of the cutting action of abrasive microparticles that remain essentially embedded in the ball during the wear test.

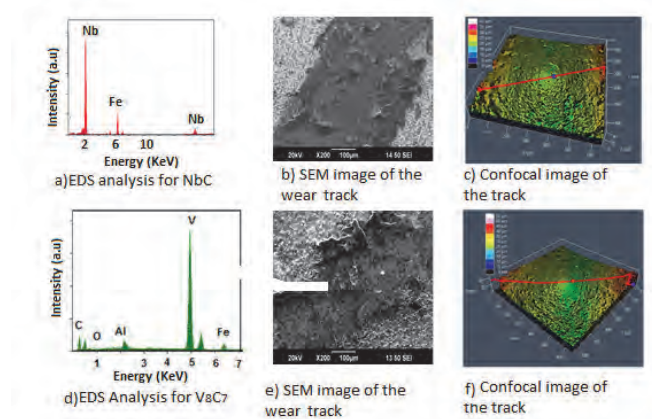


Figure 6. a) EDS analysis; b) SEM image and c) image of confocal laser microscopy, obtained for the tracks of binary carbides NbC, and the same information in figures d, e, and f for V<sub>8</sub>C<sub>7</sub>, both coatings deposited on AISI D2 steel.  
Source: The authors

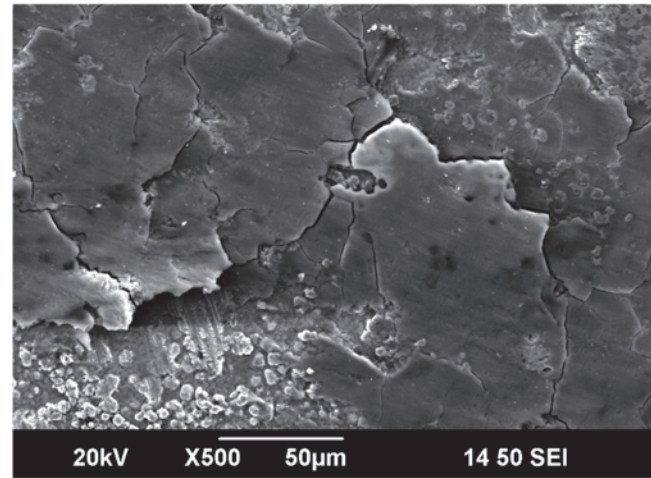


Figure 7. Detail of the wear track for the ball-on-disk test for a NbV coating deposited on AISI D2.  
Source: The authors

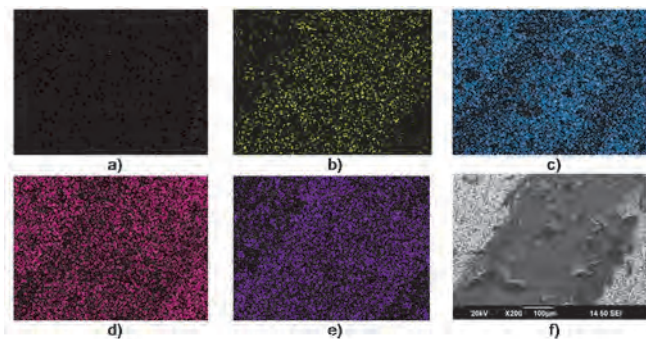


Figure 8. Elemental mapping of the coating after the wear test a) C, b) O, c) Nb, d) V, e) Fe, and f) normal SEM image.  
Source: The authors

Fig. 8 shows the elemental mapping of the coating after the wear test. In the figure it is possible to see the reduction of niobium and vanadium in the wear area, and a large amount of iron is observed in the delaminated layer.

#### 4. Conclusions

Ternary coatings of vanadium-niobium carbides were deposited via TRD; using XRD it was determined that the coatings were formed by binary compounds (NbC and VC) and a ternary one (NbVC<sub>2</sub>). The hardness value obtained was 38 GPa, which is close to the value obtained in super-hard materials. This increase in hardness can be explained by the formation of micro-deformations in the carbide and a decrease in crystal size, which is evidenced by a broadening of the XRD peaks that are exhibited in the ternary coatings. Additionally, the coating-substrate system was shown to have a lower coefficient of friction than that of the naked substrate. The binary systems show a good performance with hardness between 24 and 25 GPa and better wear performance than uncoated D2 steel.

#### Acknowledgements

The authors acknowledge the financial support of the Administrative Department of Science, Technology, and Innovation (Colciencias), through the project code 1101-521-28337 and contract 338-2011.

#### References

- [1] Marulanda, D. and Olaya, J.J., Unbalanced magnetron sputtering for producing corrosion resistance multilayer coatings. *DYNA*, 79 (171), pp. 74-79, 2012.
- [2] Su, Y.L. and Kao, W.H. Optimum multilayer TiN-TiCN coatings for wear resistance and actual application. *Wear*, 223, pp. 119-130, 1998. DOI: 10.1016/S0043-1648(98)00276-2
- [3] Castillejo, F.E., Marulanda, D., Rodríguez, O. and Olaya, J.J., Electrical furnace for producing carbide coatings using the thermoreactive deposition/diffusion technique. *DYNA*, 78 (170), pp. 192-197, 2011.
- [4] Arai, T. and Harper, S., *ASM Handbook*, 4 - Heat Treating. OH, USA: ASM International, Materials Park, 1991, 448 P.
- [5] Oliveira, C.K.N., Muñoz Riofano, R.M. and Castiletti, L.C., Evaluation of hard coatings obtained on AISI D2 steel by thermo-reactive deposition treatment. *Surface and Coatings Technology*, 201, pp. 1880-1885, 2006. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2006.03.036
- [6] Arai, T., Fujita, H., Sugimoto, Y. and Ohta, Y., Diffusion carbide coatings formed in molten Borax systems. *Journal of Materials Engineering*, 9 (2), pp. 183-189, 1987. DOI: 10.1007/BF02833709
- [7] Child H.C., Plumb, S.A. and McDermott, J.J. *Proc. Heat Treatment'84*, The Metals Society, 310, 1984.
- [8] Sinha, A.K., *ASM Handbook*, 4 - Heat Treating. OH, USA: ASM International, Materials Park, 1991, pp. 437 P.
- [9] Sen, S., Ozbek, I., Sen, U. and Bindal, C., Mechanical behavior of borides formed on borided cold work tool steel. *Surface and Coatings Technology*, 135, pp. 173-177, 2001. DOI: 10.1016/S0257-8972(00)01064-1
- [10] Sen, U., Kinetics of niobium carbide coating produced on AISI 1040 steel by thermo-reactive deposition technique. *Materials Chemistry and Physics*, 86 (1), pp. 189-194, 2004. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2004.03.002
- [11] Sen, S., Sen, U. and Bindal, C., The growth kinetics of borides formed on boronized AISI 4140 steel. *Vacuum*, 77 (2), pp. 195-202, 2005. DOI: 10.1016/j.vacuum.2004.09.005
- [12] Sen, S., A study on kinetics of Cr<sub>3</sub>C-coated high-chromium steel by thermo-reactive diffusion technique. *Vacuum*, 79 (1-2), pp. 63-70, 2005. DOI: 10.1016/j.vacuum.2005.01.009
- [13] Tavakoli, H. and Mousavi Khoie, S.M., An electrochemical study of the corrosion resistance of boride coating obtained by thermo-reactive diffusion. *Material Chemistry and Physics*, 124 (2-3), pp. 1134-1138, 2010. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2010.08.047
- [14] Castillejo, F.E., Marulanda, D.M., Olaya, J.J. and Alfonso, J.E., Wear and corrosion resistance of niobium-chromium carbide coatings on AISI D2 produced through TRD. *Surface & Coatings Technology*, 254, pp. 104-111, 2014. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.05.069
- [15] Arai, T., Komatsu, N. and Mizutani, M., Diffusion layers on steel surfaces immersed in fused borax baths containing various kinds of additives. *Journal of the Japan Institute of Metals*, 39, pp. 247-255, 1975.
- [16] Castillejo, F., Marulanda, D., Olaya, J.J. and Rodríguez, O., Electrical furnace for producing carbide coatings using the Thermoreactive deposition/diffusion technique. *DYNA*, 78 (170), pp. 192-197, 2011.
- [17] Villars, P. and Calvert, L.D., *Pearson's Handbook of Crystallographic Phases*. USA: ASM international, 1991.
- [18] Worrell, W.L. and Chipman, J., The free energies of formation of the vanadium, niobium, and tantalum carbides. *Journal of Physical Chemistry*, 68 (4), pp. 860-866, 1964. DOI: 10.1021/j100786a027
- [19] Paunovic, M. and Schlesinger, M., *Fundamentals of electrochemical deposition*, New York, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1999.
- [20] Oliver, W.C. and Pharr, G.M., An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research*, 7 (6), pp. 1564-1583, 1992. DOI: 10.1557/JMR.1992.1564
- [21] Niels, H., Hall-Petch relation and boundary strengthening. *Scripta Materialia*, 51 (8), pp. 801-806, 2004. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2004.06.002
- [22] Veprek, S., Niederhofer, A., Moto, K., Bolom, T., Männling, H.-D., Nesladek, P., Dollinger, G., and Bergmaier, A., Composition, nanostructure and origin of the ultrahardness in nc-TiN/a-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/a- and nc-TiSi<sub>2</sub> nanocomposites with H<sub>v</sub>=80 to ≥105 GPa. *Surface and Coatings Technology*, (133-134), pp. 152-159, 2000. DOI: 10.1016/S0257-8972(00)00957-9
- [23] Bourthuis, L. and Papadimitriou, G.D., The effect of microstructure and wear conditions on the wear resistance of steel metal matrix composites fabricated with PTA alloying technique. *Wear*, 266 (11-12), pp. 1155-1164, 2009. DOI: 10.1016/j.wear.2009.03.032
- [24] Staia, M.H., Pérez-Delgado, Y., Sanchez, C., Castro, A., Le Bourhis, E. and Puchi-Cabrera, E.S., Hardness properties and high-temperature wear behavior of nitrided AISI D2 tool steel, prior and after PAPVD coating. *Wear*, 267 (9-10), pp. 1452-1461, 2009. DOI: 10.1016/j.wear.2009.03.045
- [25] Castro, G., Fernández-Vicente, A. and Cid, J., Influence of the nitriding time in the wear behaviour of an AISI H13 steel during a crankshaft forging process. *Wear*, 263 (7-12), pp. 1375-1385, 2007. DOI: 10.1016/j.wear.2007.02.007
- [26] Castillejo, F.E. and Olaya, J.J., *Recubrimientos de carburos ternarios depositados con la técnica TRD*, PhD. Thesis, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 2013.
- [27] Adachi K., and Hutchings I.M., Wear-mode mapping for the micro-scale abrasion test. *Wear*, 255 (1-6), pp. 23-29, 2003. DOI: 10.1016/S0043-1648(03)00073-5

**F.E. Castillejo-Nieto**, received his BSc. Eng in Metallurgical Engineering in 1997, his MSc. in Physics in 2005, and his PhD degree in Engineering in 2014, all of them from the Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. His research interests include: Coatings and thin films, wear and corrosion resistance of materials.

**J.J. Olaya**, is an associate professor at the Departamento de Ingeniería y Mecatrónica in the Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. He conducts research in the general area of development and applications of thin films deposited by plasma assisted techniques, corrosion and wear. He received his PhD in 2005 from the Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico.

**J.E. Alfonso**, completed his BSc. degree in Physics in 1987 and his MSc. degree in Science - Physics in 1991, all of them being obtained from the Universidad Nacional de Colombia. In 1997 he completed his PhD in Science - Physics in the Universidad Autónoma de Madrid, Spain. He has taught at the Universidad Nacional de Colombia as a professor since 2000, where his research has been focused on material science, particularly on thin film processing as well as performance characterization, studying thin film optical, electrical and mechanical properties.

# Behavior of coated forming tools with TiAlN coatings grown by Triode Magnetron Sputtering

Diana Marcela Devia-Narváez <sup>a</sup>, Harold Duque-Sánchez <sup>b</sup> & Fernando Mesa <sup>c</sup>

<sup>a</sup>Departamento de Matemáticas, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia. [dianadevia@gmail.com](mailto:dianadevia@gmail.com)

<sup>b</sup>Departamento de Matemáticas, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia. [harold1@utp.edu.co](mailto:harold1@utp.edu.co)

<sup>c</sup>Departamento de Matemáticas, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia. [femesa@utp.edu.co](mailto:femesa@utp.edu.co)

Received: October 23<sup>th</sup>, 2014. Received in revised form: January 10<sup>th</sup>, 2014. Accepted: April 17<sup>th</sup>, 2014.

## Abstract

This research focusses on tribological analysis of Titanium Aluminum Nitride (TiAlN) coatings deposited by means of Triode Magnetron Sputtering, when used as a protective coating on forming tools. The analysis is carried out from the microstructural properties which directly influence the tribological behavior. It was observed that the predominant wear mechanisms on the surface are delamination and tribo-oxidation; an increase in the useful life of the tool was observed making hard coatings an excellent alternative in the metalworking industry.

**Keywords:** Delamination, Microestructure, Wear Mechanisms, TiAlN Tribo-Oxidation.

# Comportamiento de las herramientas de conformado con recubrimientos TiAlN crecido por Magnetron Sputtering Tríodo

## Resumen

Esta investigación se enfoca en el análisis tribológico de los recubrimientos de nitruro de titanio aluminio (TiAlN) depositados por la técnica Magnetron Sputtering Tríodo, cuando se utilizan como capa protectora en herramientas de conformado. El análisis se realiza a partir de las propiedades microestructurales que influyen directamente en el comportamiento tribológico. Se observó que los mecanismos de desgaste predominantes en la superficie son la delaminación y la tribo-oxidación; se determinó un incremento en la vida útil de la herramienta siendo los recubrimientos duros una excelente alternativa en la industria metalmecánica

**Palabras clave:** Delaminación, Microestructura, Mecanismos de Desgaste, TiAlN, Tribo-oxidación.

## 1. Introducción

En la actualidad los procesos de conformación en frío son ampliamente utilizados en la industria automovilística, herramientas agrícolas, electrodomésticos, juguetes, materiales de construcción y accesorios. El impacto económico en la industria se determina por las pérdidas de eficiencia, aumento en el consumo energético, el reemplazo de piezas desgastadas, los tiempos muertos de la maquinaria y lubricantes. La productividad, principalmente afectada por la calidad y repetitividad del proceso, es fuertemente influenciada por el nivel de fricción desarrollado en la zona de contacto y el desgaste de las herramientas utilizadas [1].

Sin embargo, los procesos tribológicos, fricción y desgaste, no pueden ser evitados, solo se pueden reducir si los conocimientos sobre la tribología se aplican durante el diseño y operación de los sistemas [2]. La necesidad de aumentar la productividad en la industria ha impulsado el desarrollo de nuevos compuestos para la fabricación de herramientas en el procesamiento de materiales. Este esfuerzo ha conducido a la aplicación de recubrimientos duros sobre aceros de herramientas o materiales sinterizados utilizando técnicas de deposición por plasma [3]. Aunque las técnicas de sputtering tienden a producir recubrimientos más densos que otras técnicas utilizadas para tratamientos superficiales, de acuerdo a Recco [4], la configuración del Magnetron Sputtering

Tríodo produce un incremento en la tasa de ionización que combinado con la alta energía iónica y el potencial de referencia del sustrato mejora la densidad de los recubrimientos y las propiedades estructurales, mecánicas y tribológicas.

El sistema ternario del TiAlN es un material tecnológicamente importante para diversas aplicaciones, incluyendo la resistencia al desgaste debido a la alta resistencia a la oxidación a alta temperatura [5,6]. La resistencia a la oxidación de los recubrimientos TiAlN se rigen por una mayor estabilidad química, en comparación con nitruros binarios como recubrimientos de TiN y AlN [7,8]. El objetivo de este trabajo es el análisis de los mecanismos de desgaste de las herramientas de conformado con recubrimientos de TiAlN crecidos por la técnica Magnetron Sputtering Tríodo. La investigación se concentra en el estudio de la resistencia al desgaste y las reacciones químicas. La estructura fue analizada utilizando difracción de rayos X, y la morfología fue determinada utilizando Microscopio Electrónico de Barrido.

## 2. Diseño Experimental

Los recubrimientos de TiAlN fueron depositados sobre punzones de acero AISI O1, en la Fig.1 se observa el diseño de las herramientas. Para el crecimiento de los recubrimientos se utilizó un blanco de Ti0.5Al0.5 por la técnica Magnetron Sputtering Tríodo en un sistema no comercial (Fig.2) [9]. La cámara de reacción fue construida en acero inoxidable AISI 316 de 0.4 m de diámetro y 0.35 m de longitud. Para incrementar la tasa de ionización, se introdujo una rejilla de 135 mm de diámetro y 18 mm de espesor entre el ánodo y el cátodo [9]. Se inyectó argón y nitrógeno ( $Ar + N_2$ ) en la cámara en un flujo continuo de gas. El valor del flujo de nitrógeno fue 5 sccm. Para el proceso de deposición, la presión en la cámara alcanzó un valor de  $2.67 \times 10^{-4}$  Pa y la presión de trabajo fue 0.4 Pa. El tiempo de deposición de los recubrimientos fue de 60 min con una corriente de 2 A. Las propiedades mecánicas y tribológicas

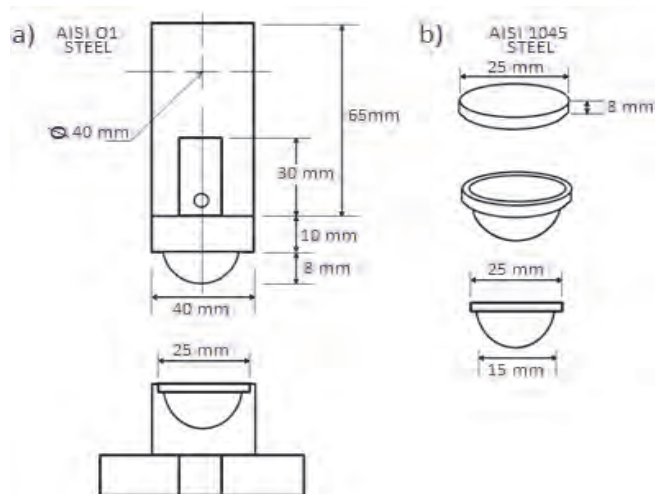


Figura 1. a) Esquema del sistema de conformado, b) Lámina de acero AISI 1045 y Probeta acero O1.

Fuente: Los autores.

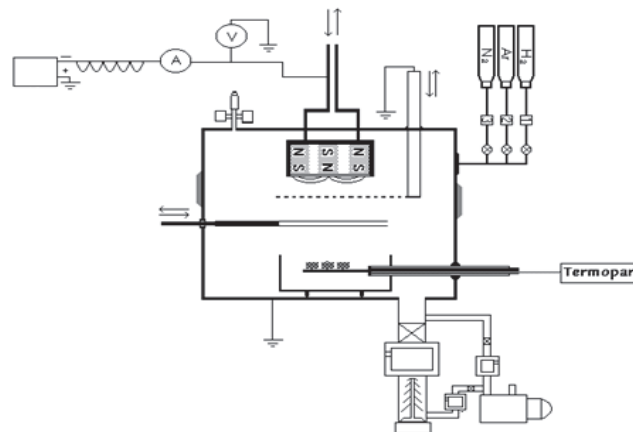


Figura 2. Representación esquemática del reactor: Magnetron Sputtering Tríodo.

Fuente: [9].

Tabla 1.

Parámetros Básicos para las pruebas de conformado.

|                       |                 |
|-----------------------|-----------------|
| Presión               | 1000Kg-F        |
| Material del punzón   | Acero AISI O1   |
| Material de la lámina | Acero AISI 1045 |
| Espesor de la lámina  | 1.50 mm         |

Fuente: Los autores.

de la superficie con y sin recubrimiento fueron analizadas en investigaciones anteriores, donde se determinó que las mejores propiedades de los recubrimientos se obtuvieron para un voltaje de polarización de 40 V; por lo tanto este parámetro se consideró para el estudio del desgaste de las herramientas recubiertas con TiAlN [10].

Las especificaciones de los principales parámetros en el proceso de embutido se observan en la Tabla 1. Los ensayos de deformación se realizaron con una prensa industrial deformando láminas de acero 1045 ejerciendo una presión en el centro de la lámina para formar la geometría mostrada en la Fig.1-b. Los ensayos de conformación se realizaron para los punzones con y sin recubrimiento. Para la herramienta sin recubrimiento se realizaron 60 unidades fabricadas debido a que en este número de ciclo se produce la falla de la superficie. Con base a esto, se analizó los puntos críticos de la herramienta para determinar los mecanismos de desgaste en la superficie recubierta cuando se han fabricado 60, 120, 180 y 230 unidades. Este análisis se realizó a partir de los cambios microestructurales.

Por medio del Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) Philips XL-30 se analizó la superficie con y sin recubrimientos. La formación de las fases en el sistema de recubrimiento se analizó utilizando un Difractómetro de Rayos - X (XRD) Bruker-AXS D8 ADVANCE de haces paralelos con geometría  $\theta/2\theta$ , radiación  $CuK\alpha$  ( $\lambda=1.5406 \text{ \AA}$ ), con una velocidad de barrido de 2 seg/paso con incrementos de  $0.02^\circ$ . Los parámetros para este análisis fueron 40 kV y 30 mA.

## 3. Análisis y Resultados

En este trabajo, se realiza un análisis del comportamiento tribológico del proceso de formación de un sistema de

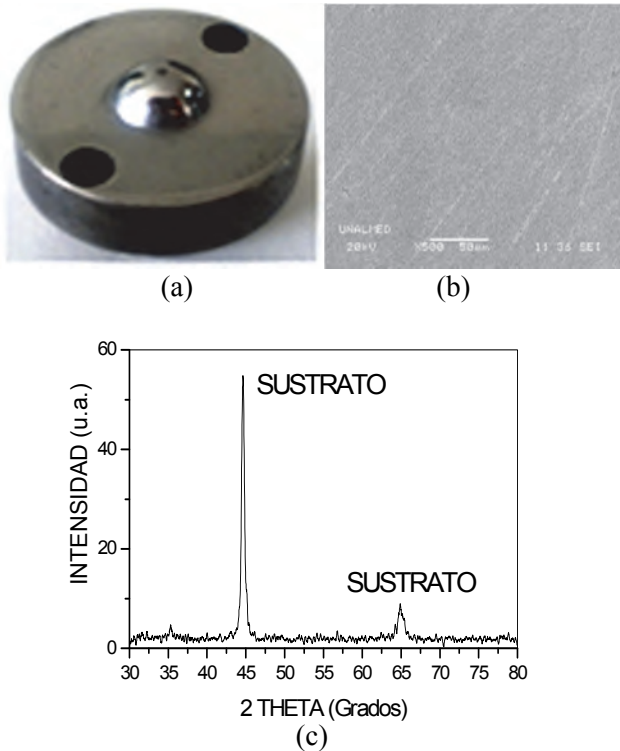


Figura 3. Punzón sin tratamiento superficial: a) Fotografía del punzón. b) Patrón de difracción y c) Micrografía X500.  
Fuente: Los autores.

punzón/lamina. Este análisis se divide en dos etapas: La primera etapa es el sistema punzón/lamina sin tratamiento superficial en la herramienta. La segunda etapa es el análisis del sistema tribológico utilizando los recubrimientos de TiAlN previamente estudiados [10].

### 3.1. Etapa I

En la Fig. 3-a se observa la herramienta sin recubrimiento cuando no ha sido sometido a ningún proceso de conformado. Las Figs. 3-b y 3-c muestra la topografía superficial obtenida con SEM y los patrones de difracción, respectivamente, para el punzón sin recubrimiento cuando no ha sido sometido a ningún proceso de conformado. En la superficie se observan algunos defectos producidos por el proceso de pulido mecánico con papel abrasivo de carburo de silicio; el patrón de difracción corresponde a la estructura martensítica propia de este tipo de acero AISI O1 para el trabajo en frío, como lo referencia Bourthis [11].

Para las superficies después de 60, 120, 180 y 230 unidades se realizaron pruebas de difracción de rayos X que mostraron la evolución de las fases presentes del recubrimiento durante el proceso de conformado y que permitieron detectar la presencia de dos fenómenos, el primer es el cambio de intensidades de los picos del compuesto de TiAlN y el segundo la formación de óxidos. En la superficie de la herramienta después de fabricar 60 y 120 unidades se observó la variación de las intensidades cristalográficas de

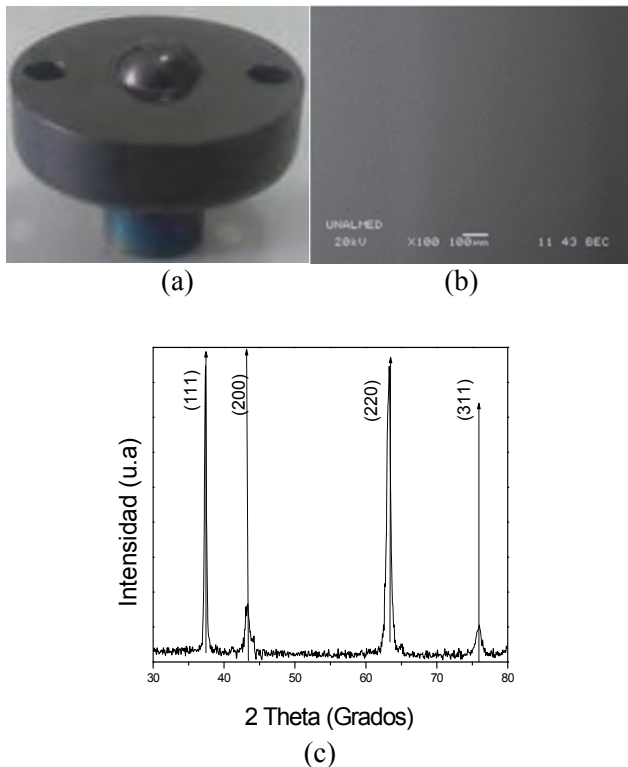


Figura 5. Superficie de la herramienta recubierta sin desgaste: a) Fotografía del punzón, b) Micrografía X100 y c) Patrón de difracción.  
Fuente: Los autores.

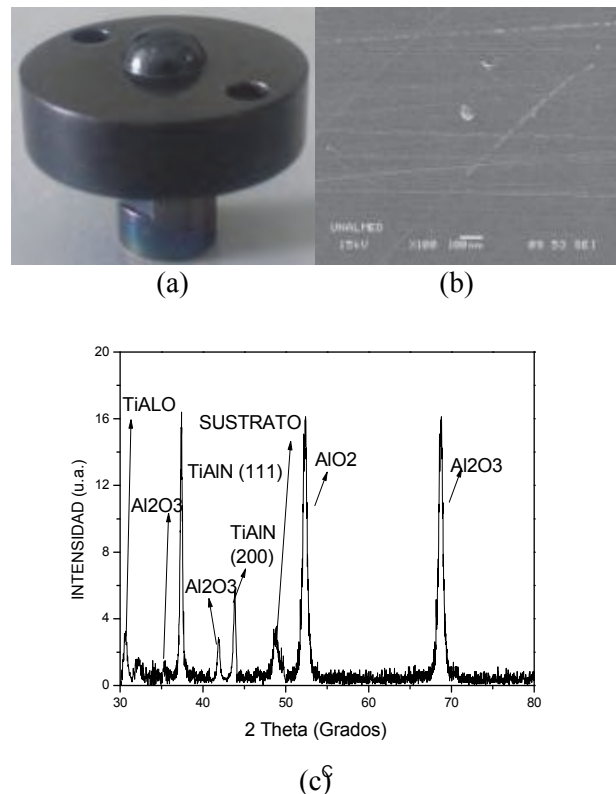


Figura 6. Superficie del punzón recubierto con 60 unidades facturadas: a) Fotografías del punzón, b) Micrografía X100 y c) Patrón de Difracción de Rayos X.  
Fuente: Los autores.

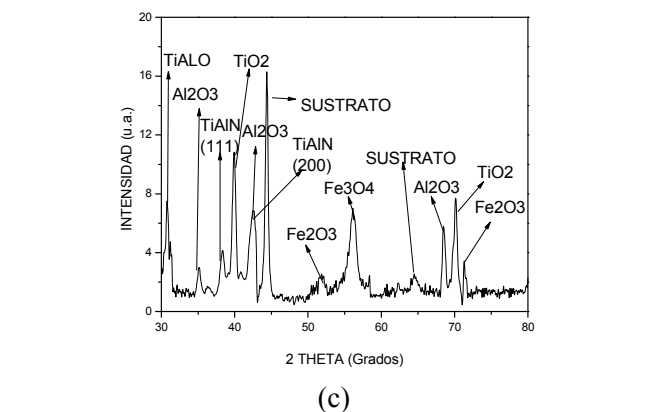
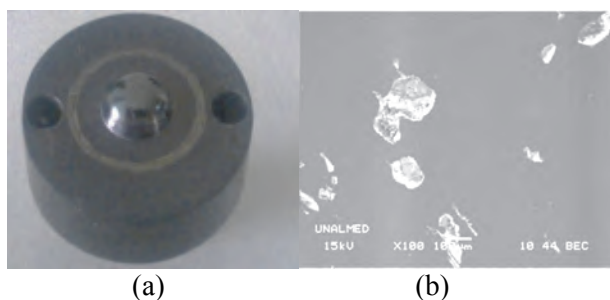


Figura 7. Superficie del punzón recubierto con 120 unidades facturadas: a) Fotografías del punzón, b) Micrografía X100 y c) Patrón de Difracción de Rayos X.

Fuente: Los autores.

las direcciones (111) y (200) de la estructura FCC del compuesto TiAlN, disminuyendo la dirección (111) y aumentando la dirección (200); este fenómeno es atribuido al esfuerzo aplicado en el sistema para que ocurra la deformación plástica de la chapa, el cual produce una variación en la densidad atómica transformando la dirección preferencial [13]. Después de fabricar 180 unidades se observó que los picos característicos del compuesto desaparecen corroborando la pérdida de la capa protectora, como se detalló en las micrografías anteriores.

El segundo fenómeno que se observa es la formación de óxidos en la superficie durante el proceso de conformado, resultado de procesos térmicamente activado, el efecto del calor se manifiesta en reordenamiento atómico de la estructura, con la formación de diferentes tipos de óxidos [14]. Según reportes de la literatura, la temperatura instantánea de contacto entre asperezas puede alcanzar valores de hasta 1000°C. Se detectaron cuatro óxidos: Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, TiAlO y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mostrados en la Tabla 2.

Los óxidos de hierro Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, considerados óxidos abrasivos por varios autores [14,15], aparecen a partir de 120 unidades fabricadas, evidenciando la delaminación parcial del recubrimiento de TiAlN. La formación de óxidos se inicia a partir de la interacción directa de la superficie del sustrato con el oxígeno del aire y la humedad (~80%) produciendo óxidos hidratados (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · H<sub>2</sub>O); debido al calor generado durante el contacto se pueden catalizar la formación de Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> la reacción  $6\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow 4\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{O}_2$ . El difractograma tomado sobre la superficie de la herramienta que fabrico 230

unidades muestra la presencia de estos dos óxidos dominantes. El fenómeno descrito anteriormente puede ser considerado como un mecanismo triboquímico por el cual la superficie falla [16].

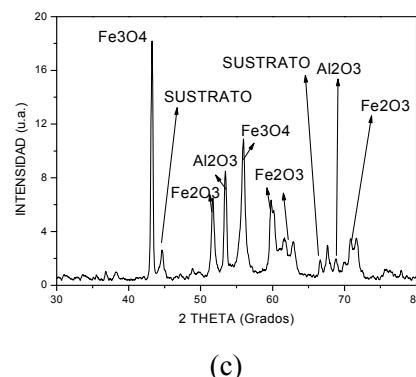
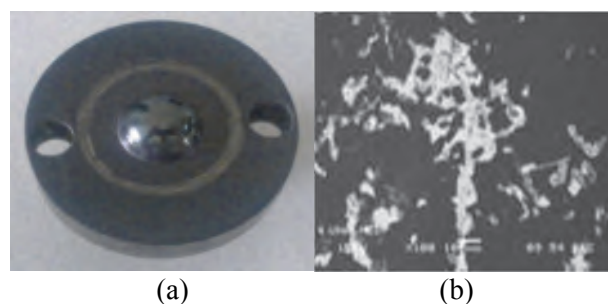


Figura 8. Superficie del punzón recubierto con 180 unidades facturadas: a) Fotografías del punzón, b) Micrografía X100 y c) Patrón de Difracción de Rayos X.

Fuente: Los autores.

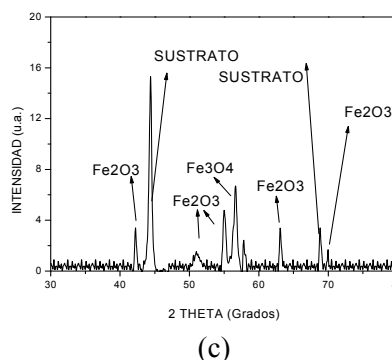
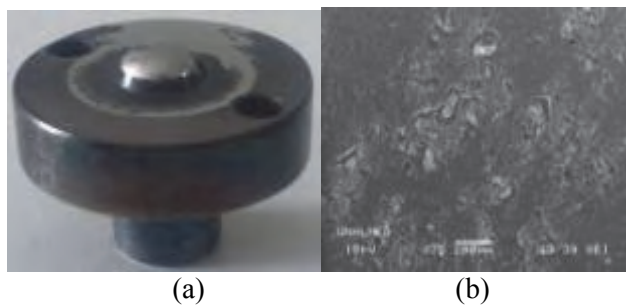


Figura 9. Superficie del punzón recubierto con 230 unidades facturadas: a) Fotografías del punzón, b) Micrografía X100 y c) Patrón de Difracción de Rayos X.

Fuente: Los autores.

Tabla 2.

Relación de los compuestos formados por tribocorrosión en función del número de procesos.

| Número de Unidades | Compuesto |                                |       |                                |                                |
|--------------------|-----------|--------------------------------|-------|--------------------------------|--------------------------------|
| 60                 | TiAlN     | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | TiAlO | -----                          | -----                          |
| 120                | TiAlN     | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | TiAlO | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> |
| 180                | -----     | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | ----- | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> |
| 230                | -----     | -----                          | ----- | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> |

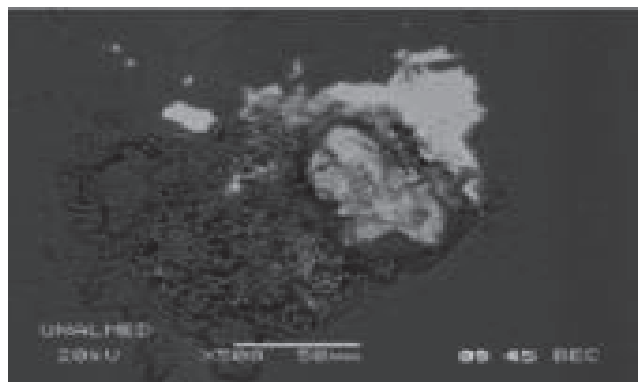
Fuente: Los autores.

Los compuestos de TiAlO y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> se comportan como capas nanométricas lubricantes sobre la superficie del TiAlN, produciendo alta resistencia al desgaste y rayado por contacto, debido a que se comporta como capa protectora, bloqueando fenómenos de óxido-reducción, en especial con el compuesto de TiAlO ya que mejora la resistencia a la fractura y tiene comportamiento de barrera térmica por la combinación de los óxidos individuales de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y TiO<sub>2</sub> [17]. Se observa que para más de 180 unidades fabricadas las fases de TiAlO y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> no son apreciables debido a que en esta zona de contacto las altas cargas cíclicas, fracturan las nanocapas de óxidos y el recubrimiento de TiAlN que protegen la superficie; la superficie del aceros AISI O1 y 1045 entran en contacto directo, incrementando la formación de óxidos abrasivos.

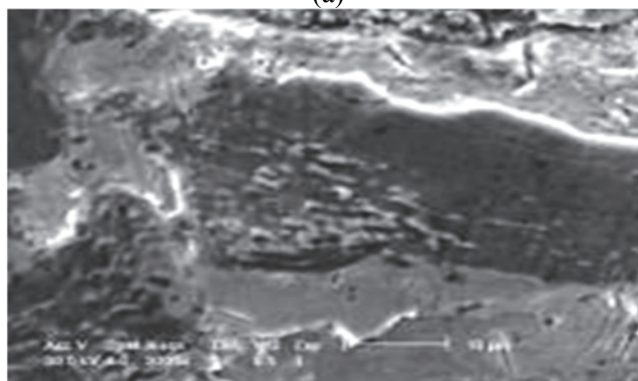
Un estudio más detallado de la superficie de la herramienta permitió detectar otros mecanismos de falla del recubrimiento. En las Figs. 10 a y b se muestran la micrografía después de 60 unidades fabricadas tomados de la parte superior del domo, donde ocurren los mayores esfuerzos, se observan el crecimiento de grietas paralelas a la superficie del sustrato. El daño progresivo de la capa puede ser atribuido, además de los esfuerzos mecánicos, a la diferencia de coeficientes de dilatación térmica para el sustrato y el recubrimiento ( $\alpha_s=1.1 \times 10^{-6}$  y  $\alpha_c=7.5 \times 10^{-6}$ , respectivamente) que promueve la nucleación de grietas dentro del recubrimiento y en la intercara sustrato-recubrimiento. Las cargas repetitivas inducen la propagación de las fisuras paralelamente a la superficie del sustrato, que al cambiar la dirección de deslizamiento se dirigen a la superficie produciendo partículas de desgaste.

Después de 120 procesos en la superficie de la herramienta se presenta mayor delaminación del recubrimientos y el incremento de capas de óxidos en la superficie, como se observó en los análisis microestructurales; estas capas de óxidos al fracturarse actúan como un tercer cuerpo que favorece la falla de la superficie como se observa en la Fig.11 a y b.

En las Figs. 12 a y b se observa la superficie de la herramienta después de 180 procesos, se presenta mayor delaminación y rayado. El mecanismo predominante para este número de procesos es la delaminación por tribo-oxidación, donde los enlaces de adhesión de la tribo-capas con el sustrato se da entre enlaces electro débiles metal-metal, debido a que es un proceso cíclico se produce delaminación en forma de placa por el incremento en las tensiones internas en la estructura cristalográfica, esto produce mayor cantidad de partículas de óxidos que aumenta los daños por rayado de tercer cuerpo [18].



(a)



(b)

Figura 10. Superficie del punzón después de fabricar 60 unidades a) X500 y b) X3000

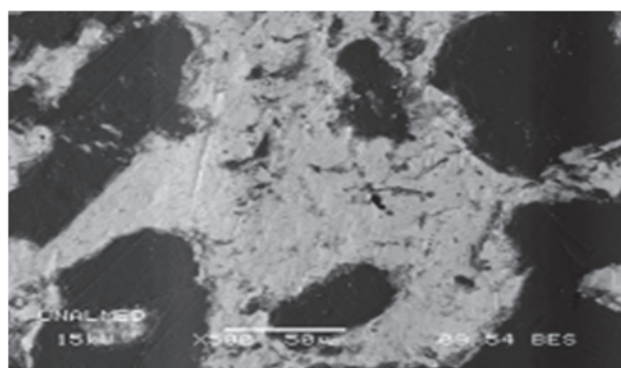
Fuente: Los autores.

Después de realizar 230 procesos, en la superficie de la herramienta se observa daño en forma de well-polished como lo reportó Shin [19] (Fig.13). El contacto final del proceso de conformado es metal-metal debido a que no se aprecia la capa cerámica del recubrimiento protector ni óxidos de los elementos pertenecientes a él.

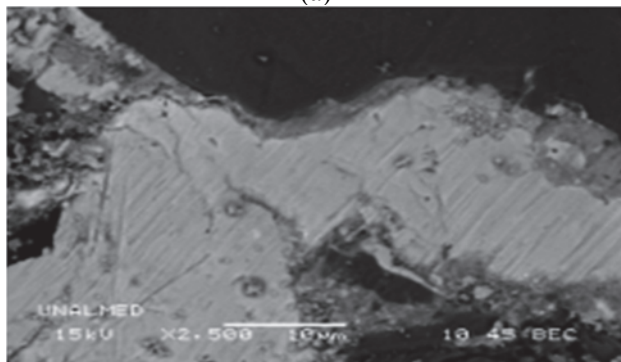
Se puede considerar tres factores por los cuales se ha desgastado el tratamiento superficial de TiAlN después de fabricar 230 unidades. El primer factor es el cambio de dureza de las partículas de desgaste que varían según su composición química (formación de óxidos) y su deformación plástica cuando se presenta el pulimiento de asperezas. El segundo factor es el comportamiento tensión-deformación, que altera la superficie del material influyendo en el desgaste, en especial cuando se efectúan procesos por contacto de cargas cíclicas. Por último, la ductilidad del material está relacionada con la mezcla de productos químicos debidos a la tribo-oxidación, donde puede generar cambios estructurales modificando la superficie [20] en el estudio realizado al desgaste de materiales dúctiles.

#### 4. Conclusiones

Durante el contacto de la herramienta con tratamiento superficial y la chapa se catalizaron reacciones triboquímicas con el oxígeno y los elementos que constituyen el sistema



(a)



(b)

Figura 11. Superficie del punzón después de fabricar 120 unidades a) X500 y b) X2500.

Fuente: Los autores.

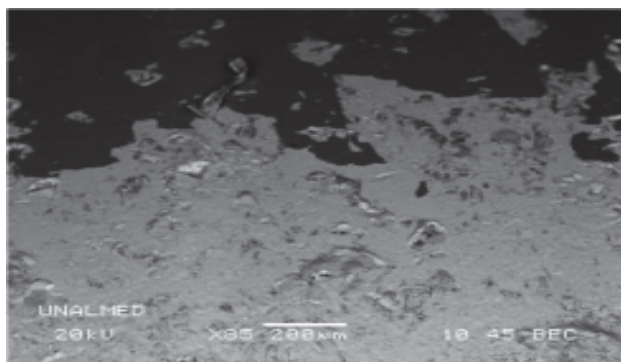
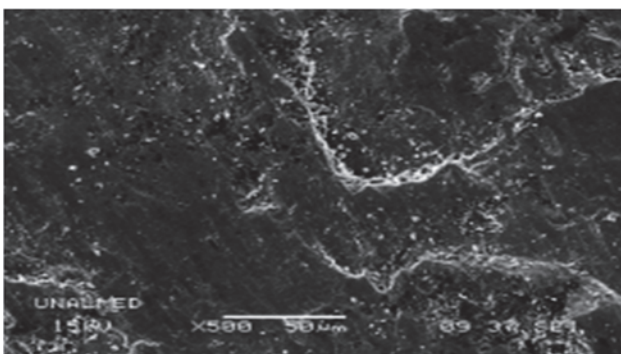
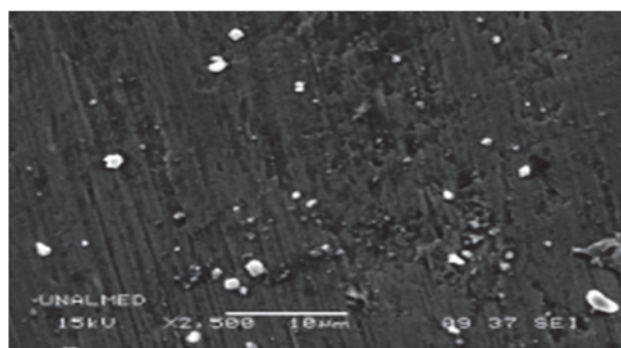


Figura 12. Superficie del punzón después de fabricar 180 unidades.

Fuente: Los autores.



(a)



(b)

Figura 13. Superficie del punzón después de fabricar 230 unidades a) Micrografía 500 y b) Micrografía X2500.

Fuente: Los autores.

tribológico; mostrando que los compuestos formados por la tribo-corrosión pueden presentar sinergia con la capa protectora de TiAlN, ya que la combinación de estas fases produce alta resistencia al desgaste y rayado por contacto. Los mecanismos identificados de falla del punzón sintratamiento superficial son: deformación plástica de la superficie y formación de óxidos en la superficie, favorecida por el calor generado durante el contacto, detectándose una combinación de mecanismos mecánicos y químicos. La formación de estos óxidos son atribuidos a la tribocorrosión, ya que durante el contacto, la fuerza mecánica que se ejerce en el sistema produce calor (producto de la deformación de la chapa), que actúa como la energía de activación necesaria para catalizar reacciones triboquímicas con el oxígeno (medio aerobio) y los elementos que constituyen el recubrimiento y el acero de la herramienta.

### Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero de a COLCIENCIAS. Los autores desean agradecer al Dr. AP Tschiptschin investigador de la Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Depto. de Engenharia e Metalúrgica de Materiais, São Paulo, SP, Brasil

### Referencias

- [1] Davis, J.R. and Semiatin, S.L., ASM Handbook, Vol. 14: Forming and Forging. ASM International, 14, 1989.
- [2] García-Díaz, J., Desgaste de cobre nanoestructurado obtenido por mecanizado por extrusión bajo gran deformación. Tesis para optar al grado de Ingeniero Industrial, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, España, 2007.
- [3] Podgornik, B., Coated machine elements, fiction or reality. Surface and Coatings Technology, (146-147), pp. 318-323, 2001.
- [4] Recco, A.A.C., Oliveira, I.C., Massi, M., Maciel, H.S. and Tschiptschin, A.P., Adhesion of reactive magnetron sputtered TiNx and TiCy coatings to AISI H13 tool steel. Surface and Coatings Technology, 202, pp.1078-1083, 2007.
- [5] Ramadoss, R., Kumar, N., Pandian, R., Dash, S., Ravindran, T.R., Arivuoli, D. and Tyagi, A.K., Tribological properties and deformation mechanism of TiAlN coating sliding with various counterbodies. Tribology International, 66, pp. 143-149, 2013.
- [6] Velez, G., Jaramillo, S., Arango, Y.C., Devia, D., Quintero, J. and Devia, A., Industrial application of thin films (TiAl)N deposited on

- thermo-wells, AIP Proceeding, American Institute of Physics Press, 875 (1), pp. 184-187, 2006.
- [7] Derflinger, V.H., Schutze, A. and Ante, M. Mechanical and structural properties of various alloyed TiAlN-based hard coatings. *Surface and Coatings Technology*, 200, pp. 4693-4700, 2006.
  - [8] Ruden, A., Gonzalez, J.M., Restrepo, J.S., Cano, M.F. and Sequeda, F., Tribology of ZrN, CrN and TiAlN thin films deposited by reactive magnetron sputtering. *DYNA*, 80 (178), pp. 95-100, 2013.
  - [9] Recco, A.A.C. and Tschiptschin, A.P., Structural and mechanical characterization of duplex multilayer coatings deposited onto H13 tool steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 1, pp. 182-188, 2012.
  - [10] Devia, D.M., Restrepo-Parra, E. and Velez-Restrepo, J.M., Structural and morphological properties of titanium aluminum nitride coatings produced by triode magnetron sputtering. *Ingeniería y Ciencia*, 10, (20), pp. 51-64, 2014.
  - [11] Bourithis, L., Papadimitriou, G.D. and Sideris, J., Comparison of wear properties of tool steels AISI D2 and O1 with the same hardness, *Tribology International*, 39, pp. 479-489, 2006.
  - [12] Son, H.S., Lee, K., Shin, S.K. and Ku, J.K., Radiative lifetimes of the FeO orange system. *Chemical Physics Letters*, 320, pp. 658-664, 2000.
  - [13] Ohring, M., *Materials science of thin films* academic press; Second edition, 2001.
  - [14] Holmberg, K. and Matthews, A., *Coatings tribology, properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering*. Elsevier, 2nd ed., 2009.
  - [15] Barrau, O., Boher, C., Vergne, C., Rczai-Aria, F. and Gras, R., Investigations of friction and wear mechanisms of hot forging tool steels. 6th International tooling conference. Karlstad, Sweden, p.p. 95-111, 2002.
  - [16] Gómez, R.M., Estudio del comportamiento a desgaste erosivo de recubrimientos wc-co micro y nano estructurados, Tesis para optar al grado de Magister, Universidad Politécnica de Valencia, España, 2009.
  - [17] Choi, B.Y., Liang, J. and Gao, W., Correlation of microstructure and high temperature oxidation resistance of plasma sprayed NiCrAl, NiCrAlY, and TiAlO composite coatings on Ti-6Al-4V. *Metals and Materials International*, 11, pp.499-503, 2005.
  - [18] Gómez-Botero, M.A., Caracterización de las propiedades tribológicas de los recubrimientos duros, Tesis para optar al grado de Doctor. Universitat de Barcelona, Barcelona, España. 2006.
  - [19] Singh, H., *Fundamentals of hydroforming*. Society of Manufacturing Engineers, 2003.
  - [20] Fox-Rabinovich, G.S., Gershman, I., El Hakim, M.A., Shalaby, M.A., Krzanowski, J.E. and Veldhuis, S.C., Tribofilm formation as a result of complex interaction at the tool/chip interface during cutting. *Lubricants*, 2, pp. 113-123, 2014.

eléctricas de la UTP en base a la normativa técnica NTC-ISO-IEC 17025. Magister en Matemáticas en la Universidad del Valle, Cali, Colombia (1990). Miembro del grupo de Laboratorio del Física del Plasma de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, Colombia y el grupo de ecuaciones diferenciales no lineales "GEDNOL" de la Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN  
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería Mecánica

Oferta de Posgrados

Maestría en Ingeniería - Ingeniería Mecánica

Mayor información:

E-mail: [acmecanica\\_med@unal.edu.co](mailto:acmecanica_med@unal.edu.co)  
Teléfono: (57-4) 4259262

**D.M. Devia-Narváez**, es profesora de matemáticas y física en la Universidad Tecnológica de Pereira-UTP, Dra. en Ingeniería (2012). MSc. en Ciencias-Física (2010). Miembro del grupo Laboratorio de plasma de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, Colombia y ecuaciones diferenciales no lineales "GEDNOL" de la Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. Los campos de trabajo: el procesamiento de materiales mediante técnicas de plasma asistida, caracterización estructural, mecánica y morfológica de los materiales y de modelado y simulación de las propiedades físicas de los materiales.

**H. Duque-Sánchez**, es profesor de matemáticas en la Universidad Tecnológica de Pereira-UTP, Pereira, Colombia. MSc. en enseñanza de la matemática (2013). Ingeniero de sistemas y computación (2007). Miembro del Grupo de Investigación en Pensamiento Matemático y Comunicación (GIPEMAC) de la Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia.

**F. Mesa**, es profesor y actualmente director del Departamento de Matemáticas de la Universidad Tecnológica de Pereira, Pererira, Colombia, MSc. Universidad Tecnológica de Pereira - UTP en Instrumentación Física (2007). Tesis: SILAB-Sistema de información para la administración del sistema de gestión de calidad del laboratorio de metrología en las variables

# Solution architecture approach, mechanism to reduce the gap between enterprise architecture and implementation of technological solutions

Martín Darío Arango-Serna <sup>a</sup>, Jesús Enrique Londoño-Salazar <sup>b</sup> & John Willian Branch-Bedoya <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. [mdarango@unal.edu.co](mailto:mdarango@unal.edu.co)

<sup>b</sup> Facultad de Ingeniería, Fundación Universitaria Católica del Norte, Medellín, Colombia. [jelondono@ucn.edu.co](mailto:jelondono@ucn.edu.co)

<sup>c</sup> Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. [jwbranch@unal.edu.co](mailto:jwbranch@unal.edu.co)

Received: October 23<sup>th</sup>, 2014. Received in revised form: July 8<sup>th</sup>, 2015. Accepted: July 21<sup>th</sup>, 2015.

## Abstract

This paper states an approach for the operationalization of a solution architecture model, as an integral part of the development process and the applications maintenance. The proposed approach has been put into practice in a Company from the financial sector. The process of construction and implementation process of technological solution in an Enterprise takes multiple practices and management models, and it brings into play different roles and actors during its execution, from the business and technological perspective. Recently, the concept of solution architecture, has emerged as a better practice (little explored and documented) and it is being used in the execution of initiatives related with the development of technology solutions cycle, also it interacts collaboratively with other better management practices as software and enterprise architecture.

**Keywords:** Solution architecture, Enterprise architecture, Software architecture, Technology solution.

# Enfoque de arquitectura de solución, mecanismo para reducir la brecha entre la arquitectura empresarial y la implementación de soluciones tecnológicas

## Resumen

Este artículo propone un enfoque para la implementación de un modelo de Arquitectura de Solución, como parte integral en el proceso de desarrollo y mantenimiento de aplicaciones informáticas. El enfoque propuesto se llevó a la práctica en una empresa del sector financiero en Colombia. El proceso de construcción e implementación de soluciones tecnológicas en una empresa incorpora múltiples prácticas y modelos de gestión, al igual que compromete a diferentes actores y roles en su ejecución, tanto desde la perspectiva de negocio como tecnológica. Recientemente, el concepto de Arquitectura de Solución, ha emergido como una mejor práctica (poco explorada y documentada), la cual se viene utilizando en la ejecución de iniciativas asociadas dentro del ciclo de desarrollo de soluciones tecnológicas, y que interactúa de forma colaborativa con otras mejores prácticas de gestión como son la Arquitectura de Software y la Arquitectura Empresarial.

**Palabras clave:** Arquitectura de Solución; Arquitectura Empresarial; Arquitectura de Software; Solución Tecnológica.

## 1. Introducción

El proceso de desarrollo y mantenimiento de aplicaciones (de tipo informático, basadas en software), y en general el desarrollo de proyectos de Tecnologías de la Información (TI), siempre han sido considerados como

uno de los ejes principales dentro de la estrategia tecnológica y como soporte vital de los procesos operativos de las empresas. Diferentes estudios realizados por empresas como Gartner, McKinsey, IDC, Stadish Group, entre otras, los cuales se abordan más adelante; han demostrado que un porcentaje significativo de los

proyectos de tecnología y específicamente los relacionados con el desarrollo de software, fracasan o cumplen de forma parcial con el alcance, recursos y funcionalidad con que fueron planteados inicialmente. Las entidades antes mencionadas coinciden en las estadísticas que año tras año publican sobre el nivel de éxito que se obtiene en la ejecución de proyectos de *software*, los cuales surgen como resultado de estudios y encuestas que se realiza a múltiples compañías alrededor de todo el mundo. A nivel de ejemplo se muestran los resultados de un estudio de 2011 realizado por Gartner [1], donde se indica que, de un total de 845 proyectos observados el 42,5% no entregaron todos los beneficios esperados, el 44% se entregaron por encima del presupuesto, y el 42% no fueron entregados a tiempo. Por su parte, para el mismo año, McKinsey y la universidad de Oxford [2], publican los resultados de un estudio diferente donde, sobre un total de 4500 proyectos de TI evaluados, en lo que respecta a los asociados con diseño de software, 66% han excedido el presupuesto, 33% han excedido los tiempos de entrega y 17% entregan menos valor y funcionalidad de los establecidos inicialmente. Los ejemplos expuestos anteriormente reflejan que la industria del software, en sus diferentes esferas, en el contexto mundial y de forma concreta en las empresas, presenta grandes oportunidades de mejora en la ejecución de los proyectos que implican construcción de software y aplicaciones; y en general, cualquier proyecto de tipo tecnológico.

Para mitigar los efectos adversos que a todo nivel se presentan en la ejecución de proyectos asociados con el proceso de desarrollo y mantenimiento de aplicaciones, las empresas invierten gran cantidad de recursos y nuevas metodologías. Algunas de las mejores prácticas que se utilizan como apoyo metodológico en la gestión de esta clase de proyectos, son las siguientes: (i) gestión de proyectos de *software* (CMMI, PRINCE2, PMBOK), (ii) gobierno de tecnologías de información –en adelante TI (COBIT, ISO/IEC 38500), (iii) operaciones en el área de TI (ITIL, MOF), (iv) desarrollo de *software* (RUP, SCRUM, XP, etc;) y (v) Arquitectura Empresarial (TOGAF, FEAF). Todas estas herramientas son habitualmente utilizadas como recursos de apoyo a la gestión de TI.

El proceso de desarrollo y mantenimiento de aplicaciones en una empresa, no sólo se centra en aspectos de tipo tecnológico, sino que también implica los aspectos y necesidades de negocio que pretende cubrirse con la ejecución de los proyectos. Para alcanzar un nivel de concepción que integre ambos enfoques (tecnología y negocio), las empresas se apoyan en el concepto de “Arquitectura”, como una forma de tener una visión más profunda que trasciende el enfoque técnico que prevalece en la actividad del diseño de *software*. A medida que el concepto de arquitectura evoluciona y es adoptado a nivel de las áreas de TI y de negocio, han ido surgiendo y posicionándose diferentes enfoques, según la especialidad y campo de acción. En el contexto del tema que se aborda en este trabajo, la reducción de brechas entre la Arquitectura Empresarial y la implementación de soluciones tecnológicas, se hace referencia a los siguientes enfoques: Arquitectura Empresarial (AE), Arquitectura de Software y Arquitectura

de Solución (AS); los cuales, en su conjunto, cubren los diferentes aspectos y fases en el proceso de implementación de soluciones de negocio que se soportan en TI. En la sección 3 del artículo, se describe cada uno de los enfoques mencionados.

En el desarrollo de este artículo, se plantea un enfoque para la operacionalización de un modelo de Arquitectura de Solución en una empresa, como un mecanismo que ayuda a reducir la brecha (*gap*) que se presenta en el proceso de desarrollo y mantenimiento de aplicaciones, en el cual intervienen diferentes roles y áreas de la organización, donde los enfoques de Arquitectura Empresarial y Arquitectura de Software también juegan un papel importante.

Los resultados que se espera alcanzar con la implementación de este tipo de estrategias, buscan incidir de forma directa en mejorar varios de los indicadores dentro del proceso de desarrollo y mantenimiento de aplicaciones, entre los que se resaltan: reducción del time-to-market (entrega oportuna al negocio de las soluciones y aplicaciones que se implementan, al contar con un diseño arquitectónico e integral de la solución), reducción del número de defectos (cumplir con los requisitos de funcionalidad y calidad de la solución desde las fases de diseño), reducción del back-log en requerimientos del negocio (atención de un mayor número de requerimientos en menos tiempo) y el aumento de la productividad de los equipos de trabajo (reflejado en un aumento de la capacidad disponible con los mismos recursos). Se requiere entonces de la implementación de nuevas estrategias y metodologías que permitan la optimización en la ejecución de los proyectos tecnológicos, espacio en el cual la Arquitectura de Solución toma un papel relevante y donde puede hacer aportes significativos.

Además, de lo anteriormente expuesto en el numeral 2, se hace referencia a diferentes enfoques de Arquitectura de Solución y que han desarrollado diferentes autores. En el numeral 3, se hace una descripción de los diferentes enfoques de arquitectura, el papel que desempeñan dentro del proceso de desarrollo de aplicaciones y la forma en que se relacionan; haciendo énfasis en la Arquitectura de Solución. En el numeral 4, se hace el despliegue del enfoque de Arquitectura de Solución en las diferentes fases donde tiene participación en el proceso de desarrollo de aplicaciones. El numeral 5, presenta una contextualización sobre la aplicación del enfoque que se propone, y el numeral 6, reúne los resultados obtenidos. Por último, en el numeral 7, se exponen las conclusiones más relevantes.

## 2. Enfoques de Arquitectura de Solución –AS–

La bibliografía analizada con relación al concepto de AS, la cual es relativamente poca, permite esclarecer diferentes concepciones con respecto a este paradigma de arquitectura, lo cual, dado la poca difusión y conocimiento que presenta en los contextos académico, tecnológico y empresarial, se convierte en una fuente de información que nutre y fortalecen la formulación de algunas de las propuestas que se plantean en el desarrollo de este artículo.

Algunos estudios existentes en los que se aborda el enfoque de Arquitectura de Solución, son los siguientes:

Tabla 1.

Enfoques de Arquitectura de Solución abordado por diferentes autores.

| Autor / Enfoque de Arquitectura de Solución                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Critchley [3]. Hace un acercamiento y descripción inicial al concepto de Arquitectura de Solución (tema poco explorado en su momento). Define el rol del arquitecto, la identificación de los atributos y el papel que este rol ejerce en el contexto de TI y de la organización.</li> <li>Slot, Dedene y Maes [4]. Presentan los resultados de un estudio que hace una medición del valor que presenta la Arquitectura de Solución en el desarrollo de proyectos de <i>software</i>. El estudio identifica y explora las diez variables que, a juicio de los autores, influyen directamente en el éxito de los proyectos de diseño de <i>software</i>.</li> <li>Togaf [5]. Presenta una descripción completa del rol del arquitecto de solución desde diferentes perspectivas. Hace una asociación de este enfoque respecto al ciclo ADM (Architecture Development Method), e incluye un mapeo de los skills respecto al marco de Togaf.</li> <li>Aggarwal [6]. Presenta caso práctico sobre la importancia que tiene la Arquitectura de Solución en el desarrollo de proyectos en el sector bancario. Se hace una descripción de las funciones principales del rol y del valor que representa como parte integral en el diseño de soluciones de negocio.</li> <li>Zimmermann et al [7]. Describen el rol de la Arquitectura de Solución en el contexto de un modelo de referencia propio, para la gestión del conocimiento de tipo arquitectónico en los servicios de TI (AKM - <i>Architectural Knowledge Management</i>).</li> <li>Poort y Hans van Vliet [8]. Plantean un enfoque de Arquitectura de Solución desde una perspectiva de la gestión del riesgo y los costos, en el proceso de diseño arquitectónico.</li> <li>Blanton y Burton [9]. Esquematiza la interrelación de los enfoques de Arquitectura Empresarial, Arquitectura de Solución y Arquitectura de Software en un entorno empresarial. Se describen los roles de cada uno de estos, las fortalezas y debilidades.</li> <li>Londoño-Salazar [10]. Presenta un caso aplicado sobre una iniciativa de estructuración del área de Arquitectura de Solución en una empresa del sector financiero. Se plantea el papel que juega este rol en el proceso de implementación de soluciones tecnológicas y su relación con la Arquitectura Empresarial.</li> </ul> |

Fuente: Elaboración propia

Por su parte el concepto de AE es desarrollado en detalle por Arango-Serna, Branch-Bedoya y Londoño-Salazar [16], con relación al análisis que se hace sobre este enfoque de arquitectura, visto como una herramienta que facilita gestionar la complejidad operativa en las organizaciones y aportar en la consolidación y operacionalización de la estrategia de negocio.

### 3. Enfoques de Arquitectura Empresarial y de TI

La teoría y sobre todo la práctica de la Arquitectura Empresarial y la arquitectura de TI, se ha venido desarrollando vertiginosamente en los últimos años. En este sentido, diferentes organizaciones a nivel mundial promueven la creación de estándares para la normalización de la práctica de estas disciplinas, entre las que se destacan: *The Open Group*, en la versión más reciente de Togaf (*the open Group architecture framework*, versión 9.1) [5], y la ISO/IEC/IEEE 42010:2011 [11], con la publicación más reciente del estándar *Systems and software engineering - Architecture description*. Ambos instrumentos desarrollan los temas asociados con el proceso de estandarización que debe darse entre los modelos y concepción de negocio, con la arquitectura y estrategia de TI; y los efectos que esta relación proyecta para el normal funcionamiento de las empresas. Por su parte, diversas empresas de la industria de

TI (IBM, ORACLE, GARTNER, etc.), han creado y posicionado sus propios marcos de arquitectura, pero tomando como base las especificaciones que emiten las organizaciones de estandarización mencionadas anteriormente [19,20].

En la Fig. 1, en lo que respecta a los aspectos de Arquitectura Empresarial (negocio y TI), se esquematizan a través de las capas 2, 3 y 4 de la misma figura; mientras que la Arquitectura de Solución se ve representada a través de la capa 5; la cual se apoya en las especificaciones que se definen a nivel de la AE, y que, sumado a una necesidad o requerimiento específico que plantee el negocio, se encarga de los diseños de tipo arquitectónico de la solución.

En la misma figura, el enfoque de arquitectura de *software* está representado en la capa 6, la cual toma como insumo la información que se genera en los dominios que le anteceden en la (AE y AS), para enfocarse en el diseño detallado y construcción de los componentes de la Arquitectura de la Solución. El aspecto asociado con el “entorno” (capa 1 de la figura), hace alusión a las diferentes variables externas que influyen en un requerimiento de negocio, y que ejerce alguna clase de efecto sobre todos los enfoques de arquitectura involucrados.

La Arquitectura Empresarial se concibe como una mejor práctica capaz de conducir el desarrollo de la empresa desde la perspectiva de alineación entre la estrategia y objetivos de TI, con los aspectos de planificación y de operación de negocio [12,13], alcanzando a tener un conocimiento y cubrimiento completo de la empresa respecto al estado actual (*As-Is*) y al estado futuro que se planea alcanzar (*To-Be*) [14, 15]. La AE, se centra en apoyar, entre otros, los siguientes aspectos: (i) acompañar el desarrollo y ejecución de la

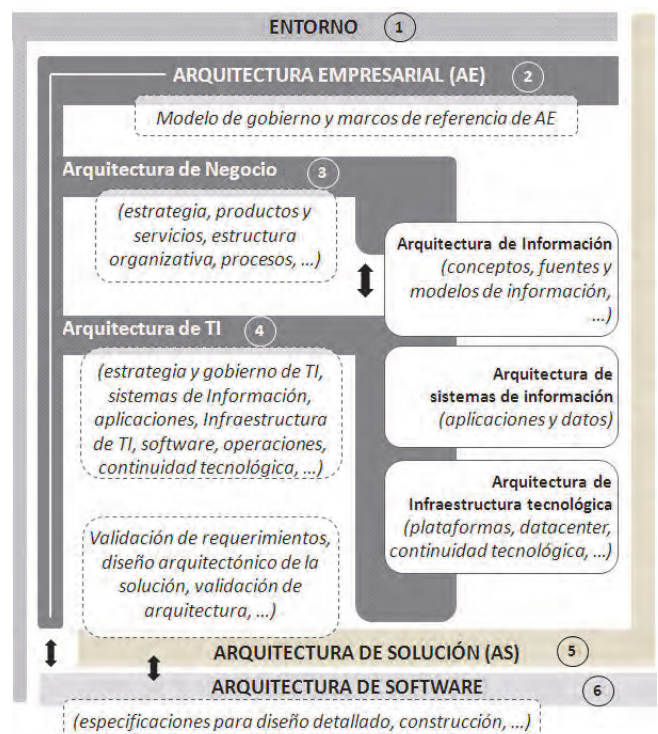


Figura 1. Entorno y enfoques de Arquitectura Empresarial y de TI.

Fuente: Elaboración propia.

estrategia de negocio en su proceso continuo de transformación, (ii) fortalecer de forma progresiva los procesos y las capacidades de negocio, (iii) operacionalizar en la práctica los cambios que presenta la empresa, y que afectan toda la estructura operativa, (iv) apoyar la orientación del norte tecnológico alineado con las estrategias de negocio y (v) explorar capacidades de innovación a partir de los recursos y capacidades existentes [16].

Por su parte, la “Arquitectura de Software” es uno de los aspectos técnicos que, desde sus orígenes, presenta avances significativos en todo lo relacionado con la ingeniería de *software* y el impacto que genera en la gestión de los Sistemas de Información (SI). Desde sus inicios, la Arquitectura de Software se concibe como una abstracción de alto nivel para los sistemas de *software*, expresado en término de componentes y conectores (Shaw; Perry y Lobo, citado en [8]). Posteriormente, a medida que evoluciona la industria del *software*, el enfoque arquitectura va presentando cambios y comienza a visualizarse como un conjunto de decisiones de diseño (sin dejar de lado los aspectos de tipo técnico) que, incorporan el contexto y la razón de la necesidad objeto de una solución [8,11]. En la actualidad en esencia se tiene la misma concepción del concepto Arquitectura de Software, pero se incorporan novedades con respecto a las técnicas utilizadas, los modelos de gestión y tendencias tecnológicas que afectan de forma directa el proceso de diseño y construcción de aplicaciones.

La IEEE presenta la definición de Arquitectura de Software que alcanza mayor aceptación en el contexto tecnológico, la cual fue publicada por primera vez bajo el estándar ANSI/IEEE 1471-2000, pero que ha ido evolucionando hasta la última versión publicada: ISO/IEC/IEEE 42010:2011. La Arquitectura de Software es la organización fundamental de un sistema, encarnada en sus componentes, las relaciones entre ellos y el ambiente, y los principios que orientan su diseño y evolución [11].

Los enfoques de arquitectura que han sido descritos hasta el momento, se centran en aspectos relacionados con los temas de alineación de TI con el negocio (del dominio de la AE), y las técnicas y mejores prácticas para el proceso de diseño y construcción de aplicaciones (del dominio de la Arquitectura de Software). Durante varios años, ambos enfoques han sabido convivir, además de la complementariedad que presentan dentro del desarrollo de proyectos informáticos; pero a medida que la AE ha ido ganando terreno en términos de un mayor acercamiento al negocio, comienzan a aparecer vacíos en el proceso de desarrollo y se amplía la brecha respecto al enfoque de la Arquitectura de Software, más específicamente en el rol que juegan ambos enfoques en el proceso de desarrollo y mantenimiento de aplicaciones.

La creciente necesidad que presentan las empresas de poder contar con soluciones tecnológicas que se ajusten efectivamente a sus necesidades, que tengan una mejor calidad sostenida en el tiempo y que puedan llevarse a producción en periodos de tiempo más cortos, entre otros aspectos, plantea nuevos retos en el proceso de desarrollo de aplicaciones.

La Arquitectura de Solución surge como un mecanismo para ayudar a generar mayor eficiencia y generación de valor

en el proceso de diseño e implementación de soluciones tecnológicas que están de cara al negocio, bajo un enfoque integral y desde una perspectiva de principio a fin. La AS posibilita un mayor acercamiento a las áreas de negocio, al comprender las necesidades que presentan y ayudarles a traducirlas en requerimientos concretos que sirvan de insumo en el proceso de estructuración, diseño e implementación de una solución tecnológica y de los procesos operativos asociados; garantizando que, desde la fase de concepción y diseño de la solución se tenga cobertura en los diferentes aspectos involucrados y se alcance una visión de “solución”.

Para Togaf [18], la Arquitectura de Solución corresponde a la descripción de una operación o actividad específica de negocio, y cómo ésta es soportada por la conjunción entre los sistemas y tecnologías de información. La Arquitectura de Solución tiene la responsabilidad del diseño arquitectónico y la documentación de un sistema, subsistema o componente en el entorno de una solución informática. Por su parte, para Gartner [17], la Arquitectura de Solución, concierne a una descripción arquitectónica de una solución específica, la cual combina la orientación de los diferentes puntos de vista de Arquitectura Empresarial (negocio, información, aplicaciones y tecnología), así como las especificaciones inherentes a la gestión operativa y los componentes relacionados con una solución.

En la Fig. 2, se presenta una sinopsis sobre los énfasis y descripción de los elementos que describen cada enfoque de arquitectura, donde la Arquitectura de Solución cumple el rol del diseño arquitectónico de un proyecto o requerimiento, el cual se convierte en el punto de intersección entre las especificaciones que define la Arquitectura Empresarial, y la función de diseño detallado y construcción que concierne a la Arquitectura de Software.

Al profundizar en la concepción que debe darse a un requerimiento o necesidad de negocio que se soporta en una implementación tecnológica, se ve que ésta siempre debe darse bajo un contexto con visión de “Solución”. La concepción que se alcanza a tener desde esta perspectiva, garantiza que la iniciativa que se emprenda, tenga un alcance

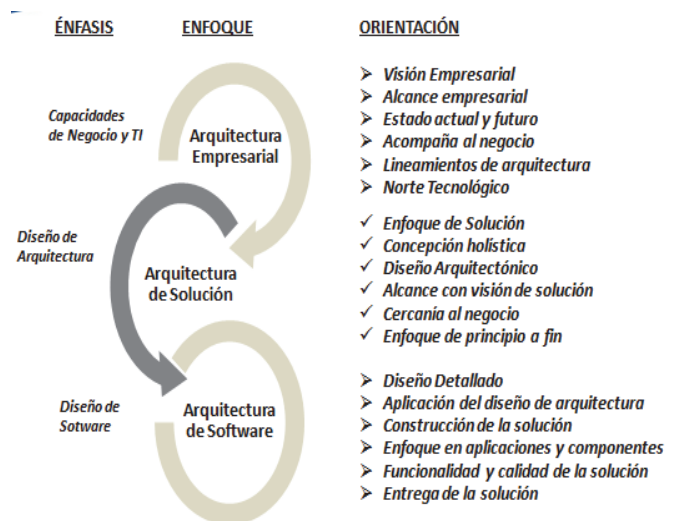


Figura 2. Énfasis y orientación de los enfoques de arquitectura.  
Fuente: Elaboración propia.

global de la necesidad, que se consideren todas las partes y componentes que la constituyen, se garantice la integridad conceptual y se alcance una interpretación y descripción del entorno que la afecta.

La Arquitectura de Solución alcanza una comprensión clara de los requerimientos de negocio, con capacidad de ser traducidos en un diseño de arquitectura con una visión integral de la necesidad (visión de solución), y no solamente desde un enfoque y alcance específico de cada aplicación o componente. Las áreas de negocio exigen que se le entreguen soluciones completas que cumplan con los requerimientos y necesidades que se hayan definido, pasando a un segundo plano el nivel de complejidad y la cantidad de aplicaciones, componentes y aspectos técnicos que haya demandado su construcción.

Las principales funciones que le competen al rol de Arquitectura de Solución son las siguientes:

- Acompañar a los usuarios en focalizar las ideas y necesidades de negocio en términos de TI y los procesos.
- Cualificaciones de los requisitos de negocio, tanto funcionales como no funcionales.
- Identificar los esfuerzos y el alcance que implica la implementación de la solución, de forma conjunta con los usuarios.
- Generar sinergias en la ejecución de diferentes proyectos que sean afines.
- Realizar el diseño arquitectónico de la solución (como función principal del rol).
- Velar porque el diseño de la solución cubra las capacidades de negocio y cumpla con los lineamientos, estándares y patrones de arquitectura.
- Realizar validaciones en diferentes fases del proceso de construcción de la solución.
- Acompañar a otros equipos de trabajo durante la ejecución de todo el proyecto.
- Recomendar y aplicar mejores prácticas y metodologías para el proceso de desarrollo de la solución.
- Garantizar la actualización del diseño arquitectónico de la solución a medida que esta evoluciona o presenta algún cambio.
- Validar la adherencia de la arquitectura en las soluciones que se implementan, cuya finalidad es garantizar que los diseños detallados de la solución cumplen con la arquitectura propuesta, y así prevenir desviaciones entre lo definido, lo diseñado y ejecutado.

En la Fig. 3, se muestra el nivel de complementariedad que existe entre los diferentes enfoques de arquitectura. Se observa cómo la Arquitectura de Solución entra a cubrir parte de los *gaps* que se presentan en los otros dos enfoques (el signo '+', indica que la característica se cubre en un alto nivel, mientras que el signo '-' significa que la característica no se cubre, o se logra en proporción baja).

#### 4. Enfoque de la Arquitectura de Solución

La concepción que debe darse a un requerimiento o proyecto empresarial que se soporta en una implementación tecnológica, siempre debe ser con visión de "Solución". Bajo esta clase de enfoque, la iniciativa que se emprenda tendrá un alcance global que garantice la integridad conceptual y la

| ARQUITECTURA EMPRESARIAL                                          |   |   |
|-------------------------------------------------------------------|---|---|
| + Principios y gobierno de Arquitectura                           |   |   |
| + Capacidades de negocio                                          |   | A |
| + Direccionamiento y modelo de negocio                            |   | R |
| - Comunicación y relacionamiento con áreas de TI.                 | + | Q |
| - Transformación e implementación                                 | + | S |
| - Nivel de detalle de los diseños de Arq.                         | + | O |
|                                                                   |   | L |
| ARQUITECTURA DE TI<br>(aplicaciones, datos, infraestructura, etc) |   |   |
| + Diseño detallado y construcción                                 |   | U |
| + Implementación, pruebas y liberación                            |   | C |
| + Dominio de la infraestructura de TI                             |   | I |
| - Conocimiento y cercanía al negocio                              | + | Ó |
| - Visión integral a nivel de solución                             | + | N |
| - Atributos de calidad                                            | + |   |

Figura 3. *Gaps* que cubre la Arquitectura de Solución respecto a otros enfoques de arquitectura

Fuente: Elaboración propia.

capacidad de interpretar y describir todo el entorno que afecta y cubre cada necesidad asociada con un proyecto específico. La AS alcanza una comprensión clara de los requerimientos de negocio, con capacidad de ser traducidos en un diseño de arquitectura con una visión transversal, y no simplemente desde el enfoque y alcance específico en el contexto de una aplicación o componente (cuya concepción y aplicabilidad corresponde al dominio de la Arquitectura de Software).

En la Fig. 4 se presenta un ejemplo asociado al sector financiero que esquematiza la forma como se interrelacionan los conceptos de "solución- aplicación-componente" donde, el concepto de solución alcanza un cubrimiento global de un requerimiento, e incluso de un proceso completo de negocio el cual involucra múltiples aplicaciones y componentes. De forma complementaria, bajo esta orientación se cubren las relaciones de uso que se dan entre los diferentes componentes que intervienen para el normal funcionamiento de la solución, tanto a nivel interno, como con otros sistemas y componentes externos.

A partir de la misma figura, se infiere la complejidad que puede llegar a alcanzar la concepción de toda una solución de negocio o parte de ella. Es a la luz de este contexto que toma relevancia del rol una Arquitectura de Solución, capaz de describir y articular los diferentes escenarios, aspectos de negocio, manejo de la información y las relaciones de uso e integración de los diferentes componentes involucrados. De igual forma, toma importancia el profundo conocimiento que se debe tener del funcionamiento del negocio y de los procesos específicos que se ven afectados por la solución; sin ese nivel de dominio, es casi imposible poder traducir a términos tecnológicos y operativos las necesidades concretas que se alcanzan a dilucidar desde el análisis de los requerimientos.

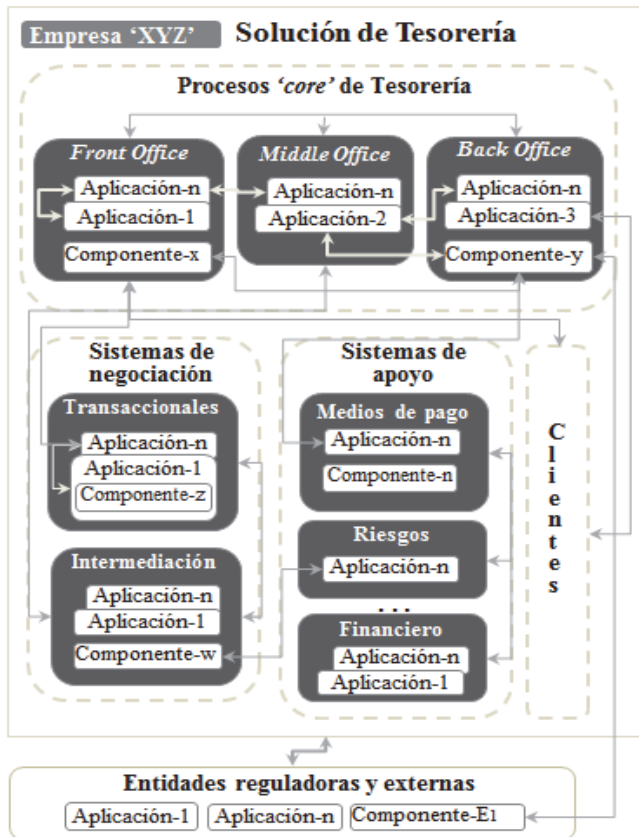


Figura 4. Ejemplo de la esquematización de una solución de negocio  
Fuente: Elaboración propia.

Al asociar el rol que desempeña la Arquitectura de Software en esta clase de enfoques, esta se centra principalmente en comprender, de manera detallada, la estructura y el funcionamiento de cada aplicativo y/o componente, con el objeto de efectuar los diseños requeridos y el proceso de construcción de los componentes de *software* que cumplan con las especificaciones planteadas. Incluso, es una labor donde intervienen diferentes arquitectos y casas de *software*, dependiendo de la complejidad y la especialidad en cuanto al dominio y conocimiento del tema.

El proceso de desarrollo y mantenimiento de aplicaciones involucra diferentes áreas, las cuales cumplen roles que van desde la definición de una necesidad de negocio y la interpretación y conversión de ésta en requerimientos de tipo arquitectónico y tecnológico, pasando por las siguientes fases: diseño de alto nivel (arquitectura), diseño detallado (construcción de la solución), implantación en ambientes controlados (pruebas), implantación en el ambiente de producción, hasta llegar, finalmente, a la liberación y entrega de la solución al usuario demandante de la misma.

## 5. Propuesta de implementación de un enfoque de Arquitectura de Solución

En la Fig. 5 se presentan las diferentes fases del ciclo de desarrollo de una solución, resaltando la cobertura que tiene cada enfoque de arquitectura. La AS entra a cubrir las fases donde se conceptualiza y se realiza el diseño de la solución,

como pasos previos para llegar al diseño detallado y al proceso de construcción.

En la fase de estructurar la necesidad, la AS se centra en los siguientes aspectos:

- Acompañar y asesorar en el proceso de estructuración de la idea o requerimiento.
- Apoyar a las áreas usuarias y líderes de iniciativas en concretar y acotar la necesidad.
- Realizar un acercamiento inicial al cubrimiento de capacidades de negocio.
- Identificar soluciones existentes que puedan dar soporte o cubrir la necesidad.
- Realimentar y hacer aportes en la especificación de requisitos, la cual es responsabilidad de las áreas usuarias.
- Hacer aportes de tipo tecnológico en la elaboración del caso de negocio del requerimiento.

En las Figs 5 y 6 se hace un despliegue de los pasos que corresponden a las dos primeras fases en que tiene participación directa el rol de AS.

Por su parte en la Fig. 7, se presenta la participación de la AS, en la fase de gestionar la demanda. La contribución principal se ve reflejada en el análisis que se hace sobre algunas de las variables que ayudan a definir la complejidad que puede presentar el desarrollo de una iniciativa o proyecto.

En la Fig. 8, se presenta el flujograma del proceso “diseñar la solución”. De igual forma, se hace una descripción detallada de cada una de las actividades en que participa la Arquitectura de Solución:

Acompañar la actividad de especificación de los requisitos.

Hacer un análisis de toda la documentación que como insumo, ingresa a la fase de diseño (modelo conceptual, definición del proceso, requisitos, casos de uso, restricciones del proyecto, etc).

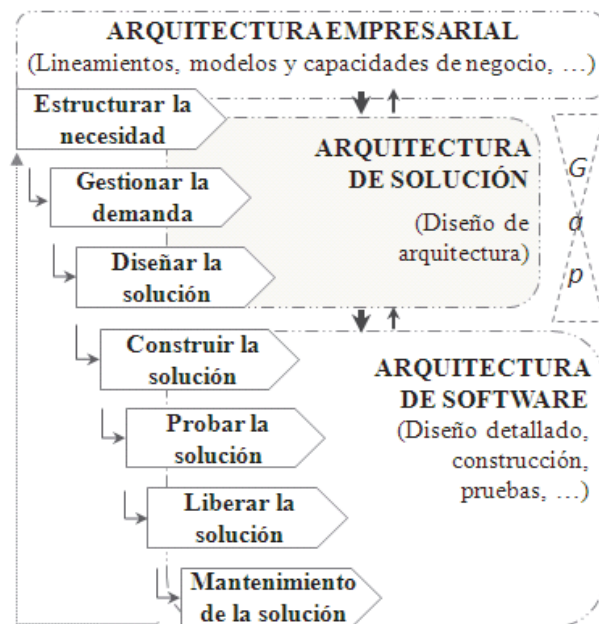


Figura 5. Ciclo del proceso de desarrollo y construcción de un proyecto de *software*  
Fuente: Elaboración propia.

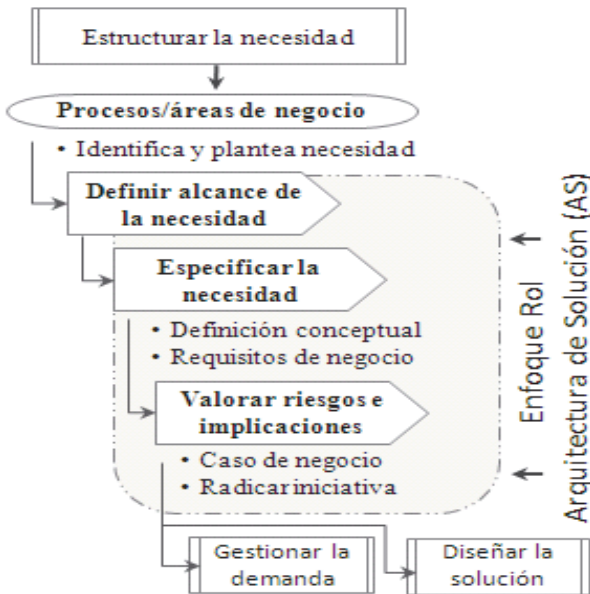


Figura 6. Rol de la AS dentro de la fase “estructurar la necesidad”  
Fuente: Elaboración propia.

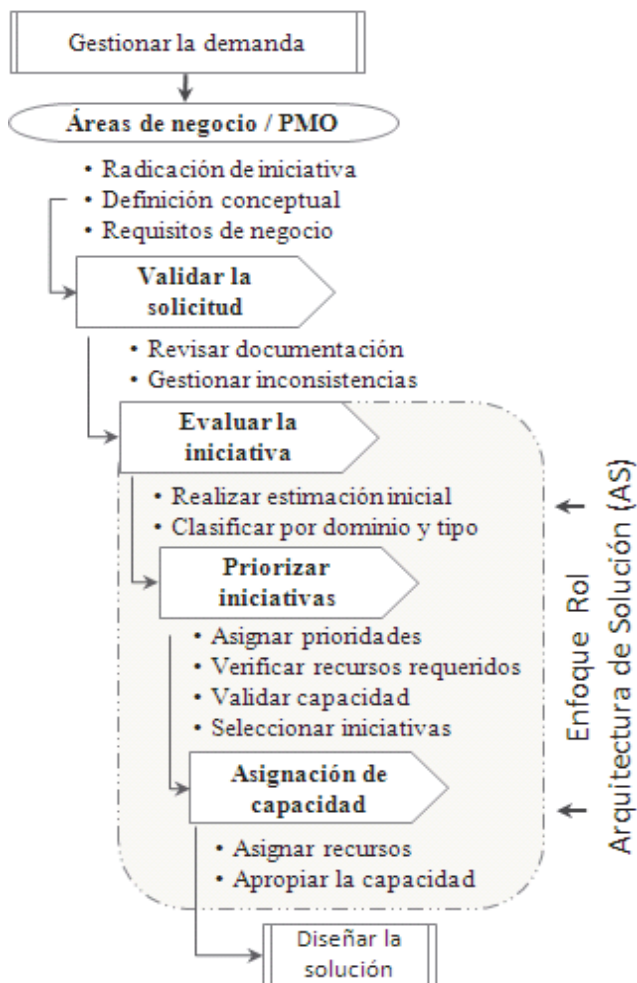


Figura 7. Rol de la AS dentro de la fase “gestionar la demanda”  
Fuente: Elaboración propia.

- Hacer un análisis de toda la documentación que como insumo, ingresa a la fase de diseño (modelo conceptual, definición del proceso, requisitos, casos de uso, restricciones del proyecto, etc).
- Construir una primera versión (de alto nivel) del diseño de arquitectura, a través de una vista de componentes y relación de uso entre los mismos.
- Realimentar con los diferentes equipos el diseño inicial de arquitectura y validar que si corresponda con el alcance definido.
- Completar el diseño de arquitectura en sus diferentes vistas: componentes y servicios, información, aplicaciones, interfaces, infraestructura, seguridad, etc. Como resultado se genera toda la documentación que contiene el diseño de arquitectura.
- Utilizar y aplicar dentro del proceso de diseño, las definiciones, los estándares, patrones y demás artefactos que se encuentran homologados por la Arquitectura Empresarial y/o el gobierno de TI.

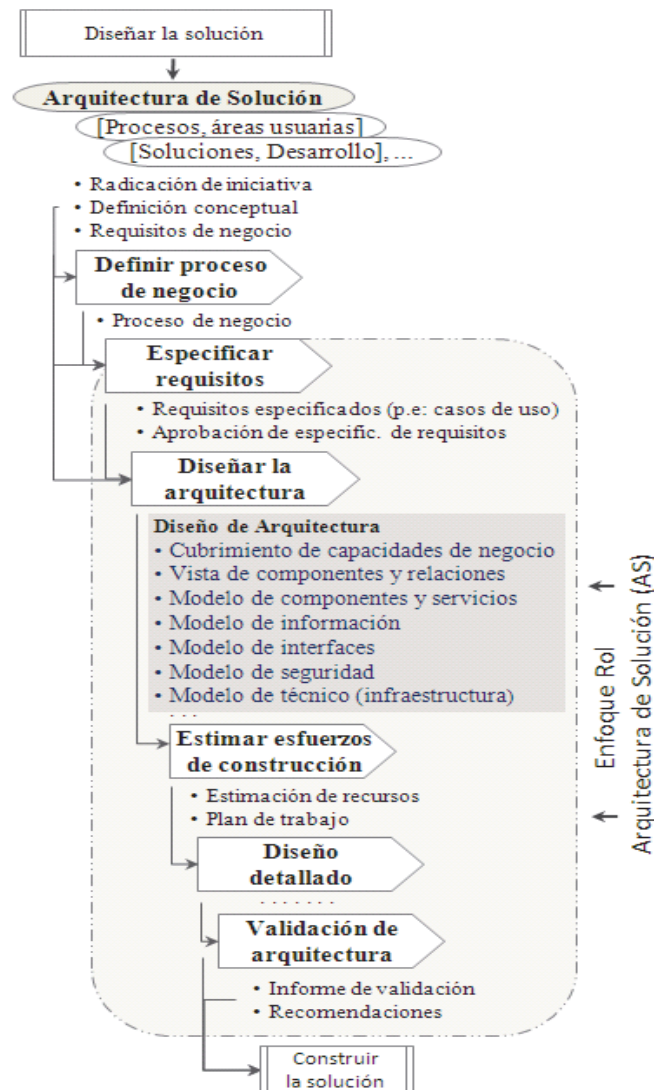


Figura 8. Rol de la AS dentro de la fase “diseñar la solución”  
Fuente: Elaboración propia.

- Realimentar a las áreas involucradas sobre el diseño final de arquitectura. Atender dudas, recibir realimentación y hacer los ajustes que sean requeridos.
- Hacer entrega oficial del diseño de arquitectura a los líderes del proyecto y demás áreas involucradas.
- En fases posteriores, donde la AS ya no tiene participación directa, la intervención es la siguiente: (i) validar la adherencia de la arquitectura, (ii) acompañar de forma focalizada algunos pasos de la fase de pruebas y (iii) verificar, en la fase de liberación, el funcionamiento de la solución, respecto al diseño de arquitectura.

## 6. Aplicación del enfoque propuesto

El enfoque de Arquitectura de Solución propuesto en este artículo, ha sido puesto en práctica dentro de la reestructuración del macro-proceso de desarrollo y mantenimiento de aplicaciones de una empresa del sector financiero en Colombia. Antes de la implementación de este modelo, desde la perspectiva de arquitectura, en el proceso participaban los roles de Arquitectura Empresarial y Arquitectura de Software (materializada en todo el ciclo y cadena de desarrollo). El diseño arquitectónico de una solución o proyecto se distribuía entre ambas áreas de arquitectura con base en algunos criterios preestablecidos. La forma en que funcionaba el proceso presentaba bastantes posibilidades de mejora en los siguientes indicadores: mejoras del *time-to-market*, reducción del número de defectos en el proceso, reducción del *back-log*, obtener mejoras en la productividad de los equipos de trabajo y mejorar la percepción del nivel de satisfacción de las áreas usuarias, entre otros aspectos. Las diferentes estrategias y acciones que se incorporaron para mejorar el proceso, llevaron a la operacionalización del rol de Arquitectura de Solución, bajo un enfoque como el explicado en el numeral 4 de este artículo.

Un cambio de esta connotación en una empresa que maneja un alto grado de complejidad en las áreas de tecnología y operaciones, conlleva a que se implemente toda una serie de estrategias relacionadas con actividades de transformación cultural, se realicen cambios en algunas de las estructuras y se conformen equipos de trabajo con diferentes skills, diversas especialidades y grado de experiencia. De igual forma, el proceso implicó hacer una definición de roles y funciones, estructurar aspectos de tipo metodológico, realizar pruebas piloto y planes de capacitación (de conocimiento del negocio, de tipo técnico-tecnológico y aspectos metodológicos), entre otros aspectos.

En la actualidad, el enfoque de Arquitectura de Solución adoptado se encuentra operando satisfactoriamente, además que presenta mejora en casi todos los indicadores del proceso de desarrollo y mantenimiento de aplicaciones. Como todo proceso de cambio, también se presentan acciones de mejora, las cuales se van realizando de forma progresiva, entre las que se resaltan: (i) garantizar la adherencia de la arquitectura en todo el ciclo de implementación, (ii) refinar y detallar los esquemas de integración de los componentes que se definen dentro de una solución, (iii), reforzar el levantamiento de información en las diferentes vistas que corresponde a la

infraestructura tecnológica y (v) garantizar la mantenibilidad de los diseños de arquitectura.

## 7. Resultados alcanzados con la aplicación del enfoque propuesto

Algunos de los resultados obtenidos durante el transcurso de un año, después de la aplicación del enfoque propuesto, son los siguientes:

A nivel de aspectos metodológicos:

- Estructuración del modelo operativo. Definir foco estratégico, portafolio de servicios, ajustes de los diferentes roles y funciones, gestionar la capacidad, indicadores de gestión, esquemas de relacionamiento con otros roles y áreas, etc.
- Estructuración del proceso vertical del rol. Definición el proceso de diseño de arquitectura, consolidar la metodología y documentación del diseño de Arquitectura de Solución, adoptar mejores prácticas, implementar un proceso de diseño iterativo, estandarizar herramientas y definir entregables y actividades de validación del diseño.
- Manejo de equipos. Definir y ejecutar planes de formación (transformacional, de negocio, metodológico y técnico), apoyar con expertos temas por línea de especialidad (afianzando la Fig. de pares), proceso de acompañamiento y seguimiento bajo la figura de ciclos cortos.
- Estrategia comunicacional. Implementar un modelo de asesorías a las diferentes áreas, acompañar a las diferentes áreas en las fases iniciales de la estructuración de la necesidad, presentar avances del diseño por hitos (ganancias tempranas), entrega oficial del diseño (a través de documentos y la figura de workshops).

Las siguientes son algunas de las mejoras alcanzadas en algunos indicadores del proceso, las cuales han sido obtenidas a partir de las mediciones realizadas en la aplicación del modelo durante un lapso de dos años en una entidad prestadora de servicios financieros, los cuales están soportados la medición de tiempos de diseño y ejecución de los proyectos, encuestas de percepción y satisfacción de quienes intervienen en la cadena de producción, mediciones de la capacidad y *time-to-market* en la entrega de las soluciones, etc.:

- Oportunidad de respuesta en la entrega de requerimientos. Se obtienen mejoras cercanas al 100% respecto a modelo anteriores.
- Reducción en la atención de incidentes (defectos en el proceso). Se obtiene una reducción cercana al 64%.
- Mejora en la eficiencia y productividad. Se alcanzan ahorros cercanos al 30% en los diseños de soluciones propias.
- Porcentaje de ocupación de la capacidad del rol de Arquitectura de Solución. 92% en promedio.
- Índice de percepción de generación de valor del área de Arquitectura de Solución. 90% en promedio.

Por último, esta experiencia fue presentada con un mayor nivel de detalle en el 1er. concurso Nacional de Arquitecturas de TI (septiembre de 2013) [10], organizado por la

Universidad de los Andes de Colombia y la organización IASA capítulo Colombia (*An Association for ALL IT Architects*), en el cual se obtuvo el 1er. puesto en la categoría ‘Arquitectura de Solución’.

## 8. Conclusiones

El enfoque de Arquitectura de Solución propuesto en este artículo, ha demostrado ser efectivo y generador de valor en el proceso de desarrollo y mantenimiento de aplicaciones (sustentado en los resultados obtenidos en el caso aplicado, respecto a los beneficios y objetivos esperados), lo cual coincide con las tesis y conceptos que exponen varios de los autores revisados.

El rol de Arquitectura de Solución es un concepto relativamente nuevo y con poco nivel de implementación empresarial en el ámbito colombiano, induciendo a que el enfoque de diseño arquitectónico se siga gestionando de forma tradicional desde las áreas de desarrollo de software, lo cual produce que se amplíe la brecha de productividad en términos de la eficiencia y calidad. El mismo fenómeno se presenta en cuanto al bajo nivel de integralidad y cohesión entre el diseño de una solución, respecto al enfoque de Arquitectura Empresarial y el efecto negativo en cuanto a la alineación de TI con el negocio. Es importante que las empresas conozcan y adopten enfoques de Arquitectura de Solución y Arquitectura Empresarial, como mecanismo que les permita mejorar los indicadores de costo-eficiencia.

La creación de nuevos roles dentro de un proceso de desarrollo de software, debe ser claramente definida y tener la certeza del aporte que hace en cuanto a la generación de valor. De igual forma definir y describir con claridad el proceso (roles, funciones, actividades, indicadores, aspectos metodológicos, etc), garantiza en un alto porcentaje el éxito y cumplimiento de los objetivos que se establecen.

Surgen nuevas ideas que abren espacio a investigaciones futuras: (i) validar la aplicación del enfoque y metodología de Arquitectura de Solución respecto a los indicadores de calidad y agilidad en el ciclo completo del proceso de desarrollo de software, (ii) refinar el proceso metodológico de la Arquitectura de Solución, para que se adecúe a metodologías de diseño ágiles que permitan optimizar los tiempos de ejecución que conlleva el diseño arquitectónico de una solución y (iii) plantear el desarrollo de métodos formales que definan los esquemas de relacionamiento de la Arquitectura de Solución, con otros roles como son: la gestión de proyectos, la gestión del riesgo y el análisis de variables de costo-eficiencia entre otras.

## Agradecimientos

El presente artículo se deriva como parte de los resultados del proyecto de investigación “Modelo funcional de integración de la Arquitectura Empresarial de N entidades alrededor de un grupo empresarial. Un enfoque de orientación a servicios y modelado de redes de capacidades”, línea de investigación: Modelización Empresarial, financiado por el Grupo de I+D+I Logística Industrial – Organizacional “GICO” de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín, Facultad de Minas.

## Referencias

- [1] Gartner., How to increase your IT project success rate [Online], pp. 1-11, 2011, [date of reference November 25<sup>th</sup> of 2013], Available at: [www.namcook.com/Articles/GartnerArticle.doc](http://www.namcook.com/Articles/GartnerArticle.doc)
- [2] McKinsey's., Delivering large-scale IT projects on time, on budget, and on value [Online], october de 2012, [date of reference December 12<sup>th</sup> of 2013], Available at: [http://www.mckinsey.com/insights/business\\_technology/delivering\\_large-scale\\_it\\_projects\\_on\\_time\\_on\\_budget\\_and\\_on\\_value](http://www.mckinsey.com/insights/business_technology/delivering_large-scale_it_projects_on_time_on_budget_and_on_value)
- [3] Critchley, J., A rough guide to solution architecture [Online], pp. 1-6, 2007, [date of reference November 30<sup>th</sup> of 2013], Available at: <http://www.solutionarchitecture.org/Workshop/Professional-development/a-rough-guide-to-solution-architecture.html>
- [4] Slot, R., Dedene, G. and Maes, R., Business value of solution architecture, advances in enterprise engineering II. Lecture Notes in Business Information Processing, 28, pp. 84-108, 2009. DOI: 10.1007/978-3-642-01859-6\_6
- [5] The Open Group., The Open Group Architectural Framework (TOGAF) Version 9.1, chapters 15.4.1 y 52.6.3. [online], 2011, [date of reference October of 2013], Available at: <http://www.opengroup.org/togaf/>.
- [6] Aggarwal, A., Banking expertise: The key value add of the solution architect, FIS Technology Consulting, pp. 1-7, 2011.
- [7] Zimmermann, O., Mikšovic, C. and Küster, J.M., Reference architecture, metamodel, and modeling principles for architectural knowledge management in information technology services, Journal of Systems and Software, Elsevier, 85, pp. 2014-2033, 2012.
- [8] Poort, E.R., Vliet, H.V. RCDA: Architecting as a risk- and cost management discipline, Journal of Systems and Software, Elsevier, 85, pp. 1995-2013, 2012. DOI:10.1016/j.jss.2012.03.071
- [9] Blanton, C. and Burton, B., Best and worst enterprise and application architecture practices you can improve, Gartner, pp. 1-27, 2013.
- [10] Londoño, J.E., Operacionalización de un modelo de arquitectura de solución como eje articulador entre la arquitectura empresarial y la implementación de soluciones tecnológicas, manuscrito inédito, Primer Concurso Nacional de Arquitecturas de TI. IV Foro Internacional en Arquitectura Empresarial. ITARC-2013, [online], pp. 1-35, 2013, Available at: <http://iasacolombia.weebly.com/concurso-nacional-de-arquitecturas-de-ti.html>
- [11] ISO/IEC/IEEE., Systems and software engineering - Architecture description, ISO/IEC/IEEE FDIS 42010, pp. 1-46, 2011.
- [12] Lankhorst, M., Enterprise architecture at work: Modelling, communication and analysis, 3<sup>a</sup> ed., Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2013, 356 P.,
- [13] Schekkerman, J., Enterprise architecture good practices guide - How to manage the enterprise architecture practice, Bloomington, Trafford Publishing, 2008, 388 P.
- [14] Ross, J.W., Weill P.P. and Robertson, D.C., Enterprise architecture as strategy: Creating a foundation for business execution, Massachusetts, Harvard Business School Press, 2006, 256 P.
- [15] Bernard, S., An introduction to enterprise architecture, 2<sup>a</sup> Ed., Bloomington, Paperback, 2005, 351 P.
- [16] Londoño, J.E., Arango. S. and Branch, J., Arquitectura empresarial como instrumento para gestionar la complejidad en las organizaciones. Revista DYNA, 81 (185), pp. 219-226, 2014. DOI: 10.15446/dyna.v81n185.41928
- [17] Gartner., IT glossary gartner research, [Online]. [date of reference December of 2013], Available at: <http://www.gartner.com/it-glossary/solution-architecture>.
- [18] The Open Group., The Open Group Architectural Framework (TOGAF) Version 9.1, chapter 3.65 [Online], 2011, [Date of reference October of 2013], Available at: <http://www.opengroup.org/togaf/>
- [19] Arango S.M., Londoño, J.E., y Zapata C.J., Arquitectura empresarial - una visión general, Revista Ingenierías Universidad de Medellín, 9 (16), pp. 101-111, 2010.
- [20] Arango S.M., Londoño, J.E. y Zapata C.J., Arquitectura orientada a servicios en el contexto de la arquitectura empresarial, Revista Avances en Sistema e Informática, 7 (2), pp. 1657-1663, 2010.

**M.D. Arango-Serna**, es graduado como Ing. Industrial en 1991, Esp. en Finanzas, Formulación y Evaluación de Proyectos en 1993 por la Universidad de Antioquia, Colombia, Esp. en Docencia Universitaria en 2007 por la Universidad Politécnica de Valencia, España, MSc. en Ingeniería de Sistemas en 1997 por la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín, Colombia y Dr. Ingeniero Industrial en 2001 por la Universidad Politécnica de Valencia, España. Es profesor titular en dedicación exclusiva adscrito al Departamento de Ingeniería de la Organización, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. Investigador senior según clasificación Colciencias 2013. Director del Grupo de I+D+i Logística Industrial- Organizacional “GICO”, grupo A1.

**J.E. Londoño-Salazar**, es Ing. de Sistemas en 1994, Esp. en Gestión de la Calidad Universitaria en 1999, MSc. en Comercio Electrónico en 2004, Esp. en Administración de Empresas en 2011 y Dr. en Ingeniería de Sistemas en 2015 por la Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. Desde 1995 a la fecha, ha trabajado en el grupo Bancolombia S.A, Colombia, en diferentes áreas de tecnologías de información (infraestructura y desarrollo), en los últimos 8 años se viene desempeñado como arquitecto empresarial y de solución en la misma entidad. Es docente investigador en la Facultad de Ingeniería de la Fundación Universitaria Católica del Norte, Colombia. Cuenta con certificaciones de industria en: Itil v3, Cobit 4.0, CISA, Togaf 1 y 2 Vers.9.

**J.W. Branch-Bedoya**, es graduado como Ing. de Minas y Metalurgia, MSc. en Ingeniería de Sistemas y Dr. en Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Colombia. Es actualmente profesor asociado en dedicación exclusiva adscrito al Departamento de Ciencias de la Computación y la Decisión de la Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. Desde junio de 2010 se desempeña como Decano de la Facultad de Minas. Es investigador senior según clasificación Colciencias 2013.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN  
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería  
de Sistemas e Informática

Oferta de Posgrados

Especialización en Sistemas  
Especialización en Mercados de Energía  
Maestría en Ingeniería - Ingeniería de Sistemas  
Doctorado en Ingeniería- Sistema e Informática

Mayor información:

E-mail: [acsei\\_med@unal.edu.co](mailto:acsei_med@unal.edu.co)  
Teléfono: (57-4) 425 5365

## Development of a digital TV receivers test suite

Pablo Flores-Guridi <sup>a</sup>, Gustavo Guimerans <sup>b</sup>, Juan Pablo Garella <sup>a</sup>, Javier Baliosian <sup>a</sup>, Eduardo Grampín <sup>a</sup>,  
Rafael Sotelo <sup>a</sup> & María Simon <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay, [pablof@fing.edu.uy](mailto:pablof@fing.edu.uy), [jpgarella@fing.edu.uy](mailto:jpgarella@fing.edu.uy), [javierba@fing.edu.uy](mailto:javierba@fing.edu.uy),  
[grampin@fing.edu.uy](mailto:grampin@fing.edu.uy), [sotelo@fing.edu.uy](mailto:sotelo@fing.edu.uy), [maria@fing.edu.uy](mailto:maria@fing.edu.uy)

<sup>b</sup> Centro de Ensayos de Software, Montevideo, Uruguay, [gusguime@ces.com.uy](mailto:gusguime@ces.com.uy)

Received October 31<sup>th</sup>, 2014. Received in revised form: March 2<sup>nd</sup>, 2015. Accepted: July 30<sup>th</sup>, 2015

### Abstract

The deployment of digital TV in Uruguay is ongoing, following the ISDB-Tb standard. The channels allocation process was completed, and after the adoption of a testing protocol, the introduction of decoders and receivers began in early 2014. Testing their compliance with the standards is of paramount importance in order to foster migration towards it and to provide a platform to local developers. The government committed the School of Engineering and the Software Testing Centre to the elaboration of the testing protocol. This article reports the key aspects of this work: the analysis of the standards, the definition of a type approval protocol and the experience gained by applying the testing procedures. Its goal is to share the experience and contribute to the improvement of the digital TV adoption process, hopefully aiding to avoid some problems that were detected during this work, both in regulation and in devices compliance to the standards.

**Keywords:** Digital Television; ISDB-T; TV Receivers Testing.

## Desarrollo de una suite de pruebas para receptores de TV digital

### Resumen

El despliegue de la televisión digital en Uruguay está en curso, siguiendo el estándar ISDB-Tb. Ya se completó el proceso de asignación de canales y, después de aprobado un protocolo de homologación, se ha comenzado a importar receptores o decodificadores desde principios de 2014. La certificación es de capital importancia para acelerar la migración y para brindar una plataforma a los desarrolladores locales. El presente artículo resume los aspectos clave de este trabajo: el análisis de las normas, la elaboración del Protocolo de Homologación y la experiencia obtenida en la aplicación de las pruebas. Su objetivo es compartir estas experiencias para contribuir en los procesos de adopción de la TV digital, con lo que se espera ayudar a que otros países o actores puedan evitar problemas de compatibilidad o cumplimiento de las normas que aparecieron durante este trabajo, tanto en la regulación como en los dispositivos ensayados.

**Palabras clave:** Televisión Digital; ISDB-T; Pruebas para Receptores de TV.

### 1. Introduction

The deployment of terrestrial digital television has technical and socio-political implications: it promises better signal quality and higher spectral efficiency, which can, in turn, give rise to a greater cultural diversity in the contents creation and distribution. Uruguay, following Brazil's leadership in the South American continent, has chosen the Integrated Services for Digital Broadcasting, Terrestrial, Brazilian version (ISDB-Tb) standard, defined by Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) [1]. Even though Uruguay has a quite high Internet penetration covering in 2013 about 65% of urban homes [2] according to the

Instituto Nacional de Estadística (INE), television is still very important. In fact, in almost 92% of Uruguayan homes there is at least one receiver and roughly 61% are cable television subscribers [3]. The free-to-air TV signal is, still, a key factor for social integration, especially in suburban and barely populated rural areas. In addition, free air television is gaining public because of its image quality.

Trial broadcasting began in late 2012, while the receivers were just starting to become available. No Uruguayan based companies are producing decoders, and therefore both Set-Top Boxes and TV sets need to be imported. Local manufacturing, in current conditions, could be envisaged only if the foreseen

market were wider than the domestic one. The Dirección Nacional de Telecomunicaciones (DINATEL) [4] has ruled that the receivers must be tested and certified in a national laboratory, recruiting the School of Engineering (Facultad de Ingeniería, Universidad de la República - UdelAR) and its partner institution, the Software Testing Centre (Centro de Ensayos de Software - CES) [5], to collaborate in the definition of the test suite. CES is a joint venture between UdelAR and the Chamber of Software Companies (Cámara Uruguaya de Tecnologías de la Información - CUTI). The CES is devoted to software testing and certification, and therefore, its participation in this project guarantees that proper procedures are followed in the testing process.

One may ask what the need is to test and certify TV receivers, being domestic appliances manufactured under a defined standard. There are three reasons: to begin with, scarce experience. Japan, where the ISDB-T standard was first implemented, has the longest history working with it. However, geographical, demographic and cultural conditions are very different from those of our country. Brazil's and Argentina's are yet quite recent deployments. Therefore, to help the local deployment, the Uruguayan government is especially interested in orienting consumers to buy receivers compatible with the standard. Secondly, intuition tell us that, having two different countries (Brazil and Argentina) implementing the standard with different objectives and strategies, some aspects should be carefully tested; this proved to be true, and after in-depth analysis and testing, which are described in this article, it was found that the standard has different and not fully compatible versions, especially regarding interactivity. Thirdly, there is a political intention of fostering the software as well as audiovisual industries, which means that the foreseen deployments are heavily based on the interactive aspects of the standard. Those branches are important in Uruguay, which is the leading per-capita software exporter in South America [6], while audiovisual, among other cultural industries, is in fast development and was responsible for about 0.45% of the GDP in 2011 [7] and is now more than 1%.

The ISDB-Tb standard has two major aspects: interactivity, and signal reception and decoding. Interactivity, implemented by a Brazilian middleware named Ginga [8], is expected to be an important component of public campaigns, advertising and on-line games. Its foreseeable users are the government (education [30], social development, health and culture ministries, among others), broadcasters, and commercial companies.

This article includes the contents of a previous work of the group, which was written immediately after the adoption of the Type Approval Protocol [9] and, therefore, is self-contained. About a year of experience in applying this test suite and following the standards evolution generated a new insight into interactivity aspects and some learned lessons about regulation and devices.

Section 2 is devoted to signal reception and decoding aspects, defining the main features to be tested. Test analysis leads to the conclusion that the theoretical set of exhaustive tests should be pruned. Indeed, the standard allows multiple configurations, not only in source coding, but also in channel coding, modulation and transmission; testing every combination would be non feasible in the real world. However, the decoder architecture implies that some features to be tested reflect the behavior of some functional

blocks. When those blocks are completely independent from each other, the corresponding features can be tested with a fixed choice of the remaining parameters. In addition, during the testing process it has been found out that many receivers did not support some of these configurations. The aim of this work was in this sense to achieve a representative subset of tests, which would guarantee a right receiver operation. Finally, the transmission requirements, established in the coverage regulation, were compared with the reception requirements, such as the receiver sensitivity, in order to determine guidelines for the receivers' installation.

Section 3 focuses on interactivity aspects, making a comparison between implementations and the standard. A thoughtful analysis was undertaken, taking into account Ginga standard documents and existing implementations in Brazil and Argentina. Important differences among the implementations were found and, more importantly, none of them are fully compliant with the standards. In some cases there are different understandings, while in many aspects there are clear deviations from the standard. Some bugs were identified that should be corrected.

In Section 4, the current situation of the approval process is referred to, emphasizing the experience gained and lessons learned, and describes some important examples in which corrections were needed.

Finally, in Section 5 the conclusions are summarized and some foreseen further work is pointed out.

This document distinguishes between the abbreviations ISDB-T and ISDB-Tb. The first one refers not only to the original version of the standard, the Japanese version, but also to its international version defined in the International ISDB-T Forum. See, for example, [10]. The second one is used to only refer to the Brazilian version, which unlike the original one, uses MPEG-4 [11,12], instead of MPEG-2 for video and audio compression and uses Ginga as interactivity middleware instead of BML.

## 2. Signal reception and decoding aspects

### 2.1. What to test: System description

The ISDB-T transmission system can be configured in many different ways regarding channel coding and modulation in order to prioritize useful bit rate or noise immunity. Such is the case of modulation scheme, transmitting mode, guard interval, convolutional code, etc. Source coding is also important to be defined in every multimedia broadcasting system; ISDB-Tb uses MPEG-4 as audio and video compression standard. Finally, automatic channel tuning, sensitivity, co-channel and adjacent channel interference, and other functionalities have also to be tested. The ISDB-Tb transmission and reception systems are entirely defined in the ABNT NBR 15601 [13] and ABNT NBR 15604 [14] respectively, while the international ISDB-T community has reached binding agreements as described in the ISDB-T Harmonization Document - Part 1: Hardware [15]. These normative references are the basis of Uruguayan Act 143/013 [16], which enforces the receivers tests following the type approval protocol generated in this work.

ISDB-T uses OFDM modulation in a 6MHz channel. This channel is divided into 13 sub-channels named "segments"; each

segment has a bandwidth of  $6/14 \text{ MHz} \approx 428.57 \text{ kHz}$ . The remaining sub-channel is used as guard interval at the sides of the OFDM spectrum. It is interesting to note that the segments can be grouped in up to three hierarchical layers named “A”, “B”, and “C”. Each hierarchical layer carries different media contents; since each layer has a different convolutional code rate, time interleaving and modulation scheme, it is possible to adjust the immunity of each media, or group of medias, independently. Two different error correction algorithms are used. The outer code is a Reed Solomon algorithm, RS(204,188), which for every transport stream packet of length 188 bytes, adds 16 bytes of redundancy capable of correcting up to 8 bytes. The inner code is a punctured convolutional code with the following possible rates:  $1/2$ ,  $2/3$ ,  $3/4$ ,  $5/6$ ,  $7/8$ . One rate has to be defined for each hierarchical layer, and they can be different for different layers. Thus, each layer can have its own trade off between useful bit rate and error immunity.

Different modulation schemes can be assigned for different layers. The ones defined in ISDB-T are DQPSK and QPSK, where each carrier transmits two bits per symbol; and also 16-QAM and 64-QAM, where each carrier transmits 4 and 6 bits per symbol respectively. ISDB-T differs from other standards, such as DVB-T and ATSC, in its capability of transmitting a low definition signal for handheld receivers in the same bandwidth, using the center segment. This signal can be used for public alarms, such as natural catastrophes warnings. For this purpose, this segment, named “segment 0”, is defined as the layer A, with very robust transmission parameters. The other 12 segments are used for the layers B, or B and C, depending on the broadcaster’s needs.

Handheld receivers, also named one\_seg receivers, tune and demodulate this “segment 0” information. In this case, layer A is usually configured to use QPSK modulation.

Unlike the one\_seg receivers, those able to tune and demodulate the full 6MHz channel are named full\_seg. Mobile full\_seg receivers, including smartphones and tablets, were not included in the first version of the protocol, but its market availability pushed the group to undertake a new version, which is in progress.

The ISDB-T transmission system can be configured to work in three different modes. These modes, keeping the total bit rate constant, increase (mode 3) or decrease (mode 1) the total number of carriers per segment and thus increase (mode 3) or decrease (mode 1) each OFDM symbol length. Particularly, modes 1, 2 and 3 use 108, 216 and 432 carriers per segment, with effective symbol lengths of  $252\mu\text{s}$ ,  $504\mu\text{s}$ , and  $1004\mu\text{s}$  respectively.

A time interleaving is added to randomize the transmitted symbols in order to strengthen the transmission against burst errors. The time interleaving parameter can be configured to  $\{0,4,8 \text{ or } 16\}$ ,  $\{0,2,4 \text{ or } 8\}$  or  $\{0,1,2 \text{ or } 4\}$ , if the system is configured to work in mode 1, 2 or 3 respectively.

As many OFDM systems, ISDB-T adds a cyclic prefix to every OFDM symbol in order to immunize the radio signal from the inter-symbol interference introduced by multipath propagation. A cyclic prefix is a copy of the last part of the OFDM symbol that is prepended to it, making the signal periodic [17]. This cyclic prefix is called “guard interval”, and its length is expressed as a fraction of the active symbol’s length,  $T_s$ . ISDB-T’s transmission system offers four possible values:  $1/4$ ,  $1/8$ ,  $1/16$  and  $1/32$ . The larger this guard

interval is, the greater the immunity to multipath fading [18]. However, the useful bit rate will decrease as the total time for each OFDM symbol increases.

So far, this section shows how complex is the ISDB-T transmission system. In addition, the source coding, consisting in video and audio compression, entails a wide span of choices. It is well known that MPEG-4 offers many options that contribute with a factor to the cardinality of the theoretical set of tests. If the goal were to test the receivers tuning and demodulation of signals with every possible configuration in the transmitter, such a test battery would imply 960 options, multiplied by the many possible combinations of hierarchical layers. Furthermore, there are 63 possible channels where to test reception (from 07 to 13 in VHF and from 14 to 69 in UHF).

The first and justified conclusion is that the exhaustive test of all possibilities was not feasible within practical times. It was needed to define a strategy able to test a representative subset of configuration parameters that can guarantee the good reception of digital terrestrial television in every approved receiver. It should be noted that the set of tests is not a full Cartesian product of all possible combinations, because independent functional blocks, whose failure is also independent, can be identified in the receiver architecture as can be seen in the Fig. 1. This issue will be explained in more detail in the following subsection.

## 2.2. How to test: Defined strategy

The defined set of tests was intended only for full\_seg receivers, particularly to Set-Top Boxes (STB) and digital television sets; however, it could be easily scalable to other types of receivers such as dongles or tablets.

An STB is a digital converter that, among other features, receives the digital signal and converts it to analogical so that it can be displayed on an analogical TV set. There are some features that any STB must have and digital TV sets do not; such is the case of video and audio output interfaces. Therefore, each test was classified according to its target: STB, digital television or both. Tests were also divided into six groups: hardware, video, audio, reception, functionalities and documentation. Each one includes different requirements in some way independent from the others.

The hardware group clusters all the interfaces and connectors requirements such as antenna input, composite video output and stereo audio output. Every connector is expected to have its own identifying name at the bottom, or in the users manual. Most of these tests were thought to have been done by visual inspection; generally, the technicians in charge only have to certify the presence of the interfaces but not put them to work. It is worthy to note that in [16] the HDMI output and the remote control implementation are not mandatory. Nevertheless, in the protocol both are expected to be present.

The video group was intended to test all video source coding configurations expected to be used by local broadcasters. Although [16] establishes that receivers must be able to decode progressive and interlaced signals, with 25, 30/1.001, 50 and 60/1.001 frames per second, in different resolutions and aspect ratios (AR), only three different configurations were included, all of them using the MPEG-4 standard, part 10: AVC/H.264, High Profile @ Level 4.0:

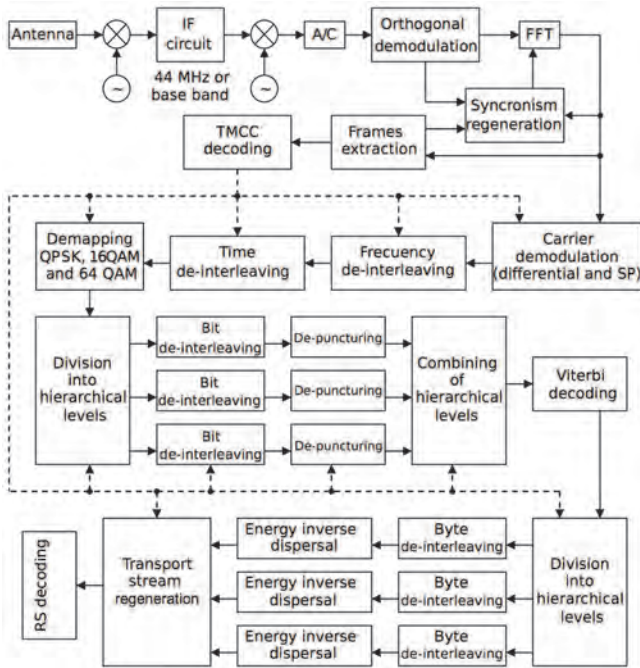


Figure 1. Signal processing in front-end for full seg receivers, based on adapted ABNT NBR 15604 *Digital terrestrial television – Receivers*. Source: The authors.

- 576i (720x576i, AR: 4:3) @ 50 Hz
- 576i (720x576i, AR: 16:9) @ 50 Hz
- 1080i (1920x1080i, AR: 16:9) @ 50 Hz

This is because Uruguayan analogical TV standard is PAL-N, which has a resolution of 720x576 pixels presented in an interlaced way, at 50 frames per second. DINATEL organized a meeting with local broadcasters, who claimed they will only use the configurations mentioned above.

The audio group was also intended to test the audio source coding configurations expected to be used by local broadcasters. Although [16] establishes receivers must be able to decode sampling rates of 32, 44.1 and 48 KHz and quantizations of 16 and 20 bits, all of them in mono, stereo and multichannel stereo audio modes; only three different configurations were included, in every case using LATM/LOAS for multiplexing and transmission:

- Profile AAC-LC, Stereo (2/0), Sample Rate 48kHz, Quantization 16 bits.
- Profile HE-AAC, Stereo (2/0), Sample Rate 48kHz, Quantization 16 bits.
- Profile HE-AAC, Multichannel Stereo (3/2 + LFE), Sample Rate 48kHz, Quantization 16 bits.

The strategy used to prune these tests was the same as for the video group.

Regarding the reception cluster, there were five important features to be tested: immunity to frequency deviations up to 30 kHz, resilience to clock deviations up to 20 ppm, sensitivity, selectivity and proper reception in every possible configuration of the transmitter. The immunity to frequency deviations can be tested with the current equipment of a Uruguayan test laboratory, the Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU), but the resilience to clock deviations

cannot; it is expected that the associated test will be implemented in the near future.

The sensitivity for every receiver is expected to be at least -77 dBm. This is not an arbitrary value: in Uruguay the coverage area for every digital TV broadcasting station is defined as the region in which the electric field is higher than 51dBμV/m [19], and there is a close relationship between these two values. Indeed, the electrical field strength (E) in dBμV/m and the power in the receiver's terminals in dBm (P) are related by [20]:

$$P[dBm] = E[dBV/m] + 20 \log(\lambda/\pi \sqrt{480}) + G[dBi] - 90dB \quad (1)$$

where G is the antenna gain in dBi and  $\lambda$  is the wavelength of the carrier. Now, if we suppose  $\lambda \approx 0.5m$ ,  $G \approx 9dBi$  and a power loss of approximately 4dB in cables and connectors, we have that:

$$P \approx -77 [dBm] \quad (2)$$

Hence, a sensitivity of at least -77 dBm is implicitly supposed when planning digital TV coverage. Therefore, sensitivity is an important parameter to be tested.

The tested selectivity values are just those specified between digital television channels. That is because in Uruguay analogical TV is limited to the VHF band and digital TV is limited to UHF band. As was mentioned above, testing if the receiver is able to tune and demodulate every possible configuration in the transmitter would lead us to define over a thousand tests. However, it is to be noted that convolutional coding, mapping, time interleaving and the insertion of the cyclic prefix are done in different and independent blocks. So then, for every transmission mode, each possible value must be tested just once. We concluded that the resulting number of configurations to define was 16, including those that broadcasters claimed they will use.

The functionalities group gathers a variety of features such as: the possibility of configuring the receiver to Spanish, the ability to perform an automatic channel tuning in the UHF band (channels 14 to 69), virtual channel support and the ability to recognize and reproduce by default the primary audio stream. In accordance with the government resolution [16], Uruguay requests the sequential channel selection through all logical channels (every service) instead of sequential channel selection through primary services.

Finally, the documentation group purpose is to require a Spanish-written user manual that includes, at least, the following topics: technical information, installation guide, user manual and service contact support. Although [16] does not require its mandatory inclusion, this decision was based on [21].

### 3. Interactivity

The interactivity aspects of the ISDB-Tb standard are implemented on the Ginga middleware, a complex piece of software that interprets applications written in NCL and that can be extended to run code written in other languages. NCL is an XML-based application language that provides support for specifying spatial-temporal synchronization among media objects, media content and presentation alternatives, exhibition on multiple devices, and live producing of interactive non-linear programs. Ginga-J is a Ginga subsystem or extension, especially promoted by the Brazilian broadcasters, that allows Ginga to run Java coded applications. Both Ginga subsystems for digital terrestrial television are standardized in [22].

Since the Ginga framework was initially developed by Telemidia Lab at the Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC) [23], the first Ginga implementation was made by PUC as a reference for the following implementations, and is the base of the ITU-T Recommendation H.761. This piece of software implemented the most relevant or demonstrative parts of the standard to be used as a guide, but was not intended to be deployed inside ISDB-Tb devices. Some industrial vendors, such as Samsung, just implemented the specification given by the standard from scratch, and others such as TQTV (TOTVS), MOPA and FUCAPI, started from PUC's implementation but all of them included the Ginga-J subsystem too, with the purpose of deploying it in their TV sets (including TV sets from Sony, SEMP-Toshiba, AOC and PANASONIC) and in Nokia and Motorola cellphones.

In the case of Argentina, the government in conjunction with the Laboratorio de Investigación y Formación en Informática Avanzada (LIFIA) [24] decided to distribute low-cost ISDB-Tb Set-Top Boxes with a license-free Ginga implementation. In this circumstances LIFIA worked on top of PUC's Ginga, restricted to the Ginga-NCL part, leaving the Java code out of their implementation. Their development is named Ginga.ar [25].

In this context, the Uruguayan government decided to design a type approval procedure to deal with a market with Brazilian-made TV sets and Argentinian-made STBs and, probably, cellphones of unexpected origin and components. There are TV sets being imported from other origins such as Mexico and China that also use the Brazilian-based Ginga developments.

To simplify this task, DINATEL decided to leave the Ginga-J extension as an optional feature in the approval process.

As a part of this type of approval protocol, the plan was to design a set of tests to check that the Ginga implementation provided by the tested device would comply with the standard. This task was based on the specification given by the standard and on two main sources of tests already developed: one vast and very specific set of tests hosted by the Brazilian-based organization Ginga-NCL Conformance Testing, launched in July 2011 with a set of more than 300 test cases [26]; and another, much smaller but more application-oriented, developed by the Argentinian LIFIA, with more than 60 test cases.

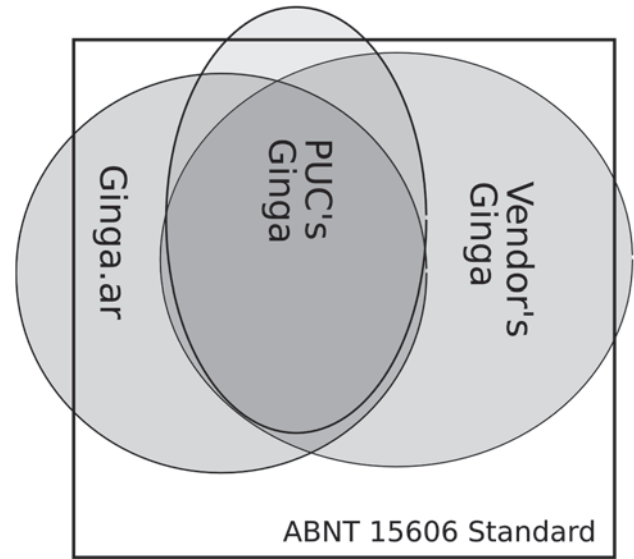


Figure 2. Different Ginga Implementations Developed Different Features. Source: The authors.

#### 3.1. Problems found

As the Ginga-NCL Conformance Testing was originally meant for IPTV and thus based on the ITU-T H.761 Ginga-NCL middleware standard; therefore, a revision and an adaptation of the test cases has been undertaken.

Smoke tests were performed on a family of Argentinian implementations and also on many Brazilian providers' products. It was found that all implementations diverge from each other and also from the standard's specification. This is reflected in several ways: some methods behave differently than is specified, some methods have different signatures, some features required by the standard were not implemented, or the middleware does implement features that are not specified in the standard.

Fig. 2 depicts this feature-coverage problem: PUC's reference implementation leaves several features, or variations of features without implementation; industry's implementations are more comprehensive but differ between them, for example Ginga.ar, which is a work in progress, has different versions with different coverage of the specified features, while all implementations have some aspects or functionalities that lay outside the standard, in general created by developers' demand. It should be noted that Fig. 2 is a pictorial representation, in which the intersections represent similar behaviors; but the size and position of the circles does not reflect any quantization of the percentage of items covered, or about their relevance.

This somewhat surprising situation led this work to explore two directions: (1) to identify, for every Ginga implementation, the coverage of the standard, and (2) to find interoperable functionalities among every implementation which would enable software developers to produce interesting interactive applications, i.e, the common subset of useful capabilities. As a first approximation, we considered two representative implementations (one Argentinian and the other Brazilian), performing the following activities:

studying the existing test suites, evaluating them by the analysis and execution of a subset of the tests on the receivers, and generating corrected versions of the tests. In general, corrections were needed for tests because they were poorly specified, and/or lag behind the latest standard versions. More than 250 tests were executed for more than 15 different configurations, showing an important degree of inconsistency among the tested implementations. For instance, considering 66 LIFIA's compliance tests for one of the implementations, we found that 21 of them, i.e. 32%, fall out of the standard due to a set of un-compliant individual features that have a relevant impact on the application design. This situation is depicted in Fig. 3.

One of the most notorious non-conformance cases, present in the actual Ginga.ar 2.1 and previous versions, is that although ABNT NBR 15606-1:2013, Table A.28, specifies that the "MENU" and "INFO" keys are reserved for the native applications and must not be used by the interactive ones, the Ginga.ar implementation enables this feature. It is possible to define a simple test case implementation to evidence that this is not fully compliant with the Ginga standard and that seriously affects the interoperability among Ginga implementations.

Other issues detected are, for example, the usage of non-standard features that are not specified in the Ginga standard like HTML5 and CSS3 contents that could use features not considered in ABNT NBR 15606-2:2011: Tables 2 and 4. Some new features such as support of elements <section> and <article> are also not considered. A similar case occurs with the "EXIT" key, Ginga.ar assumes it will close the applications while this is not a behavior defined in the standards.

### 3.2. Defined strategy

The incompatibilities described above result in a very restricted common set to be tested. Therefore, it was decided to leave the interactivity aspects of the standard temporally out of the type approval protocol.

Nevertheless, the knowledge and experience acquired during this work is a relevant asset which would be very useful to assist application developers (governmental and non-governmental organizations, as well as private content

providers), since they will face a diverse market where the receivers deploy different interactivity capabilities; some of them may decide to produce applications to reach as many users as possible (typically governmental agencies) and others may prefer to focus their efforts in selected segments of the public (e.g., owners of high-end, expensive devices).

As a result of this experience we reached the conclusion that the ISDB-Tb technology definition, and more specifically, the interactive aspects of the standard, are in rapid change. Deployment of terrestrial digital TV is an important investment of the society, and therefore it is mandatory, in order to guarantee a successful experience, to maintain a technological observatory and test laboratories, with a strong support of an expert team which can follow the evolution. Moreover, the local content developers need support to take benefit from the possibilities offered by the interactive aspects of digital TV. In the long term, we envisage that new convergence standards such as Hybrid Broadcast Broadband TV (HbbTV) will eventually take over. Again, expertise and tools are needed to keep track of the upcoming standards.

## 4. Current situation: Type approval protocol and its application

### 4.1. Approved Protocol

The knowledge and experience gained during this process is reflected in the ISDB-Tb Receivers Type Approval Protocol [27], which is currently being used in Uruguay to certify full\_seg receivers, either TV sets or STB. Other receivers, especially handheld mobiles or accessories such as USB dongles, are being included in a second part of the protocol.

The Protocol includes 21 tests regarding signal reception and decoding aspects. It also contains a description of the working environment required to perform the tests, normative references, terms and definitions and finally, Annexes specify carefully the configurations required for each test and the transmitter settings in which the receiver is expected to work properly. Each test is classified according to its target, has instructions and expected results. Besides, the presentation order of tests is devised to optimize execution time of the suite.

Those 21 tests were selected taking into account technical and practical aspects. They constitute a reasonable set, to be performed in an affordable time (4 hours) by trained workers, well suited to reveal the main failures to be expected. They cover all aspects of the operation, from the sensitivity to the display formats or the man-machine interface. They were backed by a meeting with the authorized broadcasters, in which they were asked about the options and parameters they planned to employ.

### 4.2. Experience gained during the type approval process

#### 4.2.1. Phases of work

The type approval protocol was first applied on March 2014. During the first six months a transition period took



Figure 3. Percentage of tests falling out of the standard.  
Source: The authors.

place, in which the laboratory in charge of the tests reported to the importer or manufacturer the receiver test failures. In such cases, an interactive process was allowed, in which the manufacturer could make changes in the device, mainly on firmware, in order to accomplish the requirements. During this time, about 20% of the tested devices needed at least one correction to certify.

Since August 2014, the laboratory has given no more feedback, and the only tests result is that the receiver is either approved or not. In case the device is not approved, the importer is only informed about which tests failed. So far, approximately 160 different models of receivers have been submitted for certification, 80% were TV sets and 20% STBs. Until now, about 3% have not passed the type approval protocol and thus could not be imported to the country.

In the following section, we will summarize the problems found. Some of them have been corrected during the transition period that allowed an interaction between the laboratory and the submitter, while some failures have to be solved by the original manufacturer. Detected problems gave hints to the hardware manufacturers, the companies in charge of the porting, and even generated some corrections or additions in the Uruguayan regulation.

Problems found are classified into categories. First, those related to physical problems, which may be related to external components such as connectors or remote control, or internal ones, such as the performance of the front-end tuner. Secondly, the classification is based on problems relating to firmware that were often solved by upgrades. A relevant incident implying a possible omission in an ABNT standard in relation to a technical report from ARIB that is used by manufacturers, is also reported. Some problems were found regarding tuners that are not STBs or TV sets, for which a second version of the protocol is being developed. The concept of families of models should be elucidated, in order to decide when the differences deserve a new type approval test or when the similarities make it unnecessary. Finally, a problem with virtual channels and their specification is reported.

#### 4.2.2. Physical problems

Some gross mistakes were detected, such as TV sets coming with a DVB-T tuner, which is wrong because the approved standard for free air television in the country is ISDB-T. Regarding hardware, in some cases the “F connector” was absent, while the protocol requires its presence at the antenna input. Some were submitted with the so-called “TV aerial plug” connector, also known as “Belling-Lee connector” or “TV game connector” in other regions. This connector is usually used in TV antenna installations in Europe.

Some receivers did not tune when transmission mode 1 or mode 2 were used. Even though mode 3 is expected to be the most used in real operations in Uruguay, the reception in all modes is required. Receivers that did not tune over the entire required band were also found.

Sensitivity problems were detected. Some receivers did not achieve the interference tests by a short margin, about 2 dB less sensitivity than required.

In the man-machine interface domain, TV sets samples presented the remote control written in non classical Latin characters, and some remote controls did not present a “dot” button resulting in difficulties to introduce the virtual channel and service ID, i.e. 4.1. However, this is not mandatory in the protocol.

#### 4.2.3. Firmware

Firmware failures included, among others, the absence of virtual channel support, i.e. the selection of different services by the selection of the physical channel instead of the virtual channel. Malfunction of auto-tuning was also found. Once they had already performed an auto-scan, some STBs needed to be rebooted in order to perform a new auto-scan to discover new channels. Also, some Android-based STBs had pre-stored DVB receiving channels that cannot be deleted.

Appreciable differences between the speed to perform channel scanning, among other functions was remarked upon, but in the protocol the speed is not taken into account.

In Uruguay, the analog standard is PAL-N, and therefore the STBs should generate this output as a mandatory requirement. However, some of them were suited for other analog standards.

#### 4.2.4. Possible omission in ABNT 15603

Some TV sets presented a tuning problem during the tests: in certain transmitting modes, after scanning, they presented a blank screen with the message “This video format is not supported”. However, the TV sets were able to show the name of the channel, thus evidencing that it was in fact tuned. This behavior appeared every time that the 13 segments were transmitted together in Layer A.

It was found that those TV sets interpreted the signal layers incorrectly only because the transmitted signal had a wrong parameter set in the “Network Information Table” (NIT). According to the Japanese version of the standard, in ARIB TR-B14, the descriptor “TS Information Descriptor” has a field named “Transmission Type Info” that it is used to classify the transmission layers. This field is used to describe the Transmission Parameter Type Value, which can be either Type A, Type B or Type C. This parameter must be specified for every layer and it is defined that Type A is used to define the signal as high protection layer, Type B as medium protection layer and Type C as low protection layer. In the laboratory equipment this field was set to Type C but when there is only one layer defined, i.e. the 13 segments with the same transmission parameters, according to [28] the signal should be defined as Type A.

The laboratory made the corresponding request to the manufacturer of the transmitting equipment. After checking the ABNT NBR 15603 Standard, that describes the NIT for the Brazilian ISDB-T version, the specification for that descriptor could not be found. This working group was also unable to find it. However, after changing this parameter at the transmitting equipment, the TV set was able to properly decode the signal.

#### 4.2.5. Other devices

Some tablets and USB dongles with TV tuners are being presented for approval. The protocol did not contemplate these devices. Its second version is currently under development. It should consider devices both with external antenna connector and with internal or built-in antenna. A subset of the tests used for TV sets and STB has been temporarily performed for tablets and USB dongles with external antenna connector. Devices with internal antennas have not been submitted for approval yet, but the working group is preparing tests for those kinds of receivers. Sensitivity and selectivity tests raise special issues when there is not external antenna connector that implies the creation of a controlled, uniform and adjustable electromagnetic signal.

#### 4.2.6. Definition of families of receivers

The type approval process contemplates the fact that different models of receivers belong to the same manufacturing process, and thus are considered as family members. Once one receiver has been approved in the certification process, the remaining members of the same family do not need to be tested.

In order to consider two or more different models as belonging to the same family, the manufacturer has to properly demonstrate through documentation that the two models will perform equally in the tests. This claim can be based, for instance, in the fact that both receivers use the same tuner, the same or equivalent video processing integrated circuit, the same or equivalent firmware and have also very similar or equal user and technical manuals.

The decision on whether the documentation presented is enough to consider two models as belonging to the same family has been proven to be difficult.

#### 4.2.7. Regulation about virtual channels

In ISDB-Tb, the NIT table fields “original network id” and “network id”, that perform as network identifiers and must be different for each broadcaster, are defined in Annex H of ABNT NBR 15603-2 Standard, but only for the Brazilian territory. Thus, when the tests started to be performed there was a legal loophole in the definition of these parameters for Uruguay. So, initially the “original network id” and the “network id” were set identically for every physical channel during every test. This led some receivers to fail. When tuning two or more channels they just stored one of them as if one channel was an update of the other. However, for most receivers this was not a problem.

After identifying this problem, URSEC defined in Resolution 111/2014 [29], emitted the 22nd of May 2014, the values for “original network id”, “network id”, “service id” and “country code” for each broadcaster in the national territory. After that, these parameters in the tests were changed and the problem disappeared.

#### 4.3. Foreseen evolution of the type approval test suite

The current version of the protocol is 3.1, but the test suite will evolve, since the harmonization document may -and should- have updates arising from the ISDB-T International

Forum. The standards for interactivity are especially active development. As previously written, a second version of the protocol is in progress, which will include mobile full\_seg receivers, such as tablets or smartphones. So far, interactivity tests are not included as an admission requirement, but the group is working on this aspect, in relation with CUTI, in order to develop a testbed for applications.

### 5. Conclusion and future work

This paper presents interdisciplinary research that addressed the task of producing a type approval protocol for ISDB-Tb receivers for the Uruguayan market. The work was divided in two areas: on the one hand the electrical, signal reception and decoding aspects of the standard, and on the other, the interactivity functionality.

Regarding signal reception and decoding, the main features to be tested were analyzed and a representative test set was produced (not a comprehensive one), which aims at guaranteeing a right operation of the receiver. This test set covers the functions of signal reception, processing, decoding and display, and fulfills the requirement of being practically feasible and cost-effective, while being able to soundly ensure the compatibility and performance. This test procedure was adopted by the government and is already in production.

Regarding interactivity, the analysis of the Ginga standard and its existing implementations from Brazil and Argentina led us to the conclusion that the differences between the implementations are more than marginal, and, additionally, none of them is fully compliant with the standard. In some cases we found different understandings, while in many aspects there are clear deviations from the standard. Our conclusion is that the interactivity aspects are much less mature than the reception and decoding parts, and therefore, it was decided not to perform interactivity tests in this phase of the digital TV service deployment.

The experience gained in this work calls for a critical observation of the standard evolution, which shall be exercised by a technical team with participation of government, industry, broadcasters and academia. Furthermore, interactivity is tightly coupled with Internet and social networking, and cannot be confined solely to the closed broadcast television paradigm. To this end, it is worth considering the evolution of the Hybrid Broadcast Broadband TV (HbbTV), which seems to be a more up-to-date approach.

### Acknowledgments

This work was supported by the Dirección Nacional de Telecomunicaciones y Servicios de Comunicación Audiovisual (DINATEL), Ministerio de Industria, Energía y Minería, Poder Ejecutivo, Uruguay. The working group is co-supported by the Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII).

### References

- [1] Associação Brasileira de Normas Técnicas, [online], [accessed, April 9<sup>th</sup> of 2014]. Available at: <http://www.abnt.org.br>

- [2] Instituto Nacional de Estadística (INE) y Agencia de Gobierno Electrónico y Sociedad de la Información (AGESIC), Encuesta específica de acceso y uso de TIC (EUTIC 2013), [online], [accessed, October 28<sup>th</sup> of 2014]. Available at: [http://www.agesic.gub.uy/innovaportal/file/3499/1/presentacion\\_eutic2013.pdf](http://www.agesic.gub.uy/innovaportal/file/3499/1/presentacion_eutic2013.pdf)
- [3] Instituto Nacional de Estadística, Uruguay en Cifras 2013, Uruguay, 2013.
- [4] Dirección Nacional de Telecomunicaciones y Servicios de Comunicación Audiovisual (DINATEL), [online], [accessed on April 09<sup>th</sup> of 2014]. Available at: <http://www.dinatel.gub.uy>.
- [5] Centro de Ensayos de Software, [online], [accessed on April 9<sup>th</sup> of 2014]. Available at: <http://www.ces.com.uy>.
- [6] Cámara de Comercio Uruguayo - Británica, [online], [accessed on April 24<sup>th</sup> 2014]. Available at: <http://www.camurbri.com.uy/index.php/uruguay>.
- [7] Ministerio de Educación y Cultura, [online], [accessed on April 24<sup>th</sup> 2014]. Available at: [http://www.mec.gub.uy/innovaportal/v/1613/8/mecweb/cuenta\\_satelite\\_en\\_cultura?3colid=690](http://www.mec.gub.uy/innovaportal/v/1613/8/mecweb/cuenta_satelite_en_cultura?3colid=690)
- [8] Sitio Oficial del Middleware Ginga, [online], [accessed on October 20<sup>th</sup> 2014]. Available at: <http://www.ginga.org.br>,
- [9] Flores-Guridi, P., Garella, J.P., Guimerans, G., Baliosian, J., Grampín E. and Simon M., Testing ISDB-Tb Digital TV Receivers, XXI International Conference on Electrical Eng., Electronics Eng. and Computer Science (INTERCON 2014), pp 221-226, Arequipa, Peru, August, 2014.
- [10] ISDB-T Official Web Site, [online], [accessed on April 11<sup>th</sup> 2014]. Available at: <http://www.dibeg.org>
- [11] ISO/IEC14496-3:2009 – Information technology – Coding of audio - visual objects - Part 3: Audio.
- [12] ISO/IEC 14496-10:2012 - Information technology - Coding of audio-visual objects - Part 10: Advanced Video Coding.
- [13] Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT NBR 15601: Digital Terrestrial Television - Transmission System, Brazil, 2007.
- [14] Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT NBR 15604: Digital Terrestrial Television - Receivers, Brazil, 2007.
- [15] Foro Internacional de ISDB-T 2012, ISDB-T Documento de Armonización - Parte 1: Hardware, [online], [accessed on October 27<sup>th</sup> of 2014]. Available at: [http://archivo.presidencia.gub.uy/sci/decretos/2013/05/miem\\_850\\_a\\_nexo1.pdf](http://archivo.presidencia.gub.uy/sci/decretos/2013/05/miem_850_a_nexo1.pdf).
- [16] Ministerio de Industria, Energía y Minería - Poder Ejecutivo, Decreto número 143/013 - Fijarse las especificaciones técnicas que deberán cumplir los aparatos receptores de Televisión Digital Terrestre para el estándar ISDB-T, Montevideo, Uruguay, 2013.
- [17] Edfors, O., Sandell, M., van de Beek, J.-J., Landström, D. and Sjöberg, F., An Introduction to Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, Thesis, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden, 1996.
- [18] Rodríguez-Díaz, B., Differential STBC for OFDM based wireless systems, Ph.D. Thesis, Technischen Universität Hamburg-Harburg, 2007.
- [19] Unidad Reguladora de Servicios de Comunicaciones, Pliego de Bases y Condiciones - Llamado a Interesados para obtener autorización destinada a brindar el Servicio de Radiodifusión de Televisión digital comercial con estación principal ubicada en el Departamento de Montevideo, Montevideo, Uruguay, 2013.
- [20] Middleton, J., PR & D. White, Paper: The Calibration of VHF/UHF field strength measuring equipment, British Broadcasting Corporation, 2008.
- [21] Ministerio de Industria, Energía y Minería - Poder Ejecutivo, Decreto Número 141/992 - Régimen de rotulaciones de productos envasados en ausencia del cliente, listo para ofrecerlo a los consumidores - Con las modificaciones introducidas por el Decreto 231/006, Montevideo, Uruguay, 2006.
- [22] Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT NBR 15606 Digital terrestrial television - Data coding and transmission specification for digital broadcasting, Parts 1 to 9, Brazil.
- [23] TeleMidia Laboratory, Computer Science Department of Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro, [online], [accessed on April 11<sup>th</sup> of 2014]. Available at: <http://www.telemidia.puc-rio.br>.
- [24] Laboratorio de Investigación y Formación en Informática Avanzada (LIFIA), Universidad de La Plata, [online], [accessed on April 11<sup>th</sup> of 2014]. Available at: <http://lifia.info.unlp.edu.ar/es/>,
- [25] Ginga.ar, [online], [accessed on: 11<sup>th</sup> April of 2014]. Available at: <http://tvd.lifia.info.unlp.edu.ar/ginga.ar/index.php/download>.
- [26] Ginga-NCL Conformance Testing, [online], [accessed on October 20<sup>th</sup> of 2014]. Available at: <http://testsuite.gingancil.org.br>.
- [27] Protocolo de Homologación de Receptores ISDB-Tb, [online], [accessed on October 28<sup>th</sup> of 2014]. Available at: <http://www.dinatel.gub.uy/-/publican-protocolo-de-homologacion-de-receptores-de-tvd>.
- [28] Association of Radio Industries and Businesses, Operational Guidelines for Digital Terrestrial Television Broadcasting - Fascicle 1, Version 3.8, 2008.
- [29] Unidad Reguladora de Servicios de Comunicaciones, Resolución 111/2014 - Establecer criterios de determinación de los campos en las estaciones transmisoras de Televisión Digital Terrestre en el Territorio Nacional, Montevideo, Uruguay, 2014, [online], [accessed on October 27<sup>th</sup> of 2014]. Available at: <https://www.ursec.gub.uy/inicio/transparencia/resoluciones/2014>,
- [30] Moreno-López, G.A. and Jiménez-Builes, J.A., Cycle of PDCA T-Learning model and its application on interactive digital TV, DYNA, 173 (2), pp. 61-70, 2012.

**P. Flores-Guridi**, received his Electrical Engineering degree of from the Universidad de la República (UdelAR), Uruguay in 2012, and is currently working on his Master's degree thesis in the field of Telecommunications. Flores is a teaching assistant at the School of Engineering of UdelAR, Uruguay and has participated in various research projects on digital broadcasting. His main academic interests include digital broadcasting systems, channel coding and software defined radio.

**G. Guimerans**, received his Computer Engineering degree from the Universidad de la República (UdelAR), Uruguay in 2010. He works as a General Manager of the Software Testing Center (Centro de Ensayos de Software (CES)), and also as teaching assistant in computer science at UdelAR. Guimerans entered the IT industry in 2007, and since then he has worked as an auditor developer, systems administrator, trainer, consultant, manager, and speaker. He has worked with a variety of platforms and technologies, consulting for nonprofits, telecoms, financial services, and others companies with public and private partners. His main research interests include performance testing and enterprise software.

**J.P. Garella**, received his degree in Electrical Engineering from the Universidad de la República (UdelAR), Uruguay in 2011. He is currently undertaking his Master's degree in Electrical Engineering at the same university. He has participated in research projects on digital television with emphasis in perceived video quality estimation, no reference metrics and QoS monitoring. Currently he is working as a consultant in the approval of ISDB-Tb receiver task undertaken at the Digital TV Lab, LATU, Uruguay. His research interests include: Perceived Video Quality; QoE; Digital TV; ISDB-Tb.

**J. Baliosian**, received his degree in Computer Engineering from the Universidad de la República, Uruguay (UdelAR) in 1998, and his PhD in 2005, from the Polytechnic University of Catalonia (UPC), Spain. Javier has been working professionally since 1994 as a developer, designer, architect and leader of diverse distributed systems developments. He has been involved in several collaborative research projects with different groups such as the Computer Laboratory of the University of Cambridge and the Laboratory of Communication Networks at KTH in Sweden and the Ericsson Ireland Research Centre, where he worked as a researcher and project coordinator from 2005 to 2007. Since then, Javier has been working in the Department of Computer Science at the Universidad de la República, Uruguay, where he is contributing to several network management research projects. Javier Baliosian is also in the TPC of the main network management conferences such as NOMS and IM.

**E. Grampín**, received his degree in Electrical Engineering from the Universidad de la República (UdelAR), Uruguay in 1995, and completed his

PhD in 2005 at the Polytechnic University of Catalonia (UPC), Spain. He has been working as a part-time teaching assistant in Computer Science at Udelar, Uruguay and also as a network engineer at the Uruguayan Public Telecommunication Corporation (ANTEL), and since 1994, in the planning and operation of IP networks. After completion of his PhD he obtained an associate professor tenure-track position in Udelar, Uruguay and became a professor in 2014. Grampin has been involved in several collaborative research projects with both academic and industry partners. He has completed several visiting professorships in different universities, spending one year in a post-doctoral position in 2010, at the Carlos III University (UC3M) in Madrid, Spain. His main research interests include autonomic, policy-based network management of wired and wireless networks, interdomain routing, traffic engineering, software defined networks, network experimentation and reproducible research.

**R. Sotelo**, is the Director of ICT Dept. at the Universidad de Montevideo, Uruguay and associate professor at Universidad de la República, Uruguay. He completed his degree in Electrical Engineering in 1994 and his MBA in 1999. He received his PhD degree in Telematics Engineering in 2010, from Universidad de Vigo, Spain. He has worked in the broadcasting and cable TV industry since 1991. He is advisor at DINATEL/MIEM. His main research interests are in the areas of quality of experience in multimedia applications, transmission of DTV and recommender systems.

**M. Simon**, is Electrical Engineer and professor in the field of Telecommunications at Uruguay's Public University, Universidad de la República (Udelar), Uruguay. Her academic interests, in the field of telecommunications, include Information theory, signal coding and data networks, especially traffic studies. She is also working in digital television. She was Minister of Education and Culture between 2008 and 2011 and President of the Board of ANTEL (National Administration of Telecommunications, public company) between 2005 and 2007. She was Dean of the School of Engineering from 1998 to 2005. In 2014 she was elected as Dean from a new term.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN  
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería  
Eléctrica e Ingeniería de Control

Oferta de Posgrados

Maestría en Ingeniería - Ingeniería Eléctrica

Mayor información:

E-mail: [ingelcontro\\_med@unal.edu.co](mailto:ingelcontro_med@unal.edu.co)  
Teléfono: (57-4) 425 52 64

## Channel connections resistance at elevated temperatures

Yisel Larrúa-Pardo <sup>a</sup>, Rafael Larrúa-Quevedo <sup>b</sup> & Valdir Pignatta Silva <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Facultad de Construcciones, Universidad de Camagüey, Camagüey, Cuba. [yisel.larrua@reduc.edu.cu](mailto:yisel.larrua@reduc.edu.cu)

<sup>b</sup> Facultad de Construcciones, Universidad de Camagüey, Camagüey, Cuba. [rafael.larrua@reduc.edu.cu](mailto:rafael.larrua@reduc.edu.cu)

<sup>c</sup> Departamento de Estruturas e Geotécnica, EPUSP / Universidad de São Paulo USP, São Paulo, Brazil, [valpigss@usp.br](mailto:valpigss@usp.br)

Received: November 10<sup>th</sup>, 2014. Received in revised form: March 24<sup>th</sup>, 2015. Accepted: May 26<sup>th</sup>, 2015.

### Abstract

In this paper the thermal analysis of the push out test of steel – concrete channel connections at elevated temperatures is carried out. The study takes into account numeric results generated by the program SuperTempealc for two alternatives: protected and unprotected beams. Temperatures are proposed to be considered in determining the reduction factors of resistance and the impact of these results in determining the strength of the connection is evaluated. Finally, a simplified method for calculating the resistance of the connection is proposed, which considers defined temperatures in the concrete by the thermal analysis and is consistent with the formulations for calculating the resistance of channel connections at room temperature and with the current formulation for stud connections at elevated temperatures provided by international codes.

**Key words:** thermal analysis; channel connections; fire; resistance.

## Resistencia de las conexiones tipo canal a elevadas temperaturas

### Resumen

En el trabajo se realiza el análisis térmico del ensayo push-out de conexiones tipo canal en estructuras compuestas acero – concreto a elevadas temperaturas a partir de resultados numéricos generados por el programa SuperTempealc. El estudio se realiza para dos alternativas: vigas sin revestimiento contra incendio y vigas revestidas. Se proponen las temperaturas a considerar en el concreto para determinar los factores de reducción de su resistencia y se valora el impacto de estos resultados en la determinación de la resistencia de la conexión. Finalmente, se propone un método simplificado para determinar la resistencia de la conexión, que considera temperaturas en el concreto definidas a través del análisis térmico y es coherente con las expresiones de cálculo de la resistencia de las conexiones tipo canal a temperatura ambiente y con la formulación para conexiones tipo perno a elevadas temperaturas vigente en la literatura internacional.

**Palabras claves:** análisis térmico; conexiones tipo canal; incendio; resistencia.

### 1. Introducción

En las estructuras compuestas de acero y concreto, la conexión constituye un componente esencial debido a que cumple la función de transmitir las fuerzas longitudinales del elemento de acero al de concreto y viceversa, y además resistir las fuerzas transversales que tienden a causar la separación entre los elementos.

De los conectores empleados en la práctica constructiva internacional, el conector tipo perno (*stud*) es el más difundido. Su uso presenta ventajas como fácil colocación y rapidez en la operación, pero la necesidad de tecnología especial limita su empleo. Por otra parte, el conector tipo

canal, se fabrica fácilmente a partir de perfiles o chapas de acero, y la unión con la viga se realiza mediante soldadura convencional.

Internacionalmente, se ha desarrollado un gran número de ensayos de conectores, denominados usualmente como ensayos *push-out*, para evaluar la resistencia y el comportamiento carga-deslizamiento de las conexiones a temperatura ambiente, principalmente relacionados con las conexiones tipo perno, y en menor medida, en las conexiones tipo canal. Los programas experimentales de conexiones tipo canal se han desarrollado fundamentalmente en la región americana [1,2] y sus principales normativas incluyen formulaciones para el cálculo de su resistencia.

Contrastando con la gran cantidad de ensayos *push-out* llevados a cabo a temperatura ambiente, se han realizado un número reducido del propio tipo de ensayo a elevadas temperaturas. En 1992, fueron realizados los primeros ensayos de conexiones a elevadas temperaturas en el Centre Technique Industriel de la Construction Métallique (CTICM), Francia [3]. Los resultados de esta relevante investigación sirvieron de base para el establecimiento de los criterios para el diseño de las conexiones tipo perno en situación de incendio, vigentes en el Eurocódigo 4 Parte 1-2 (EN 1994-1-2) [4]. Recientemente se han realizado nuevos ensayos de conexiones tipo perno a elevadas temperaturas, entre los que sobresalen tres programas experimentales desarrollados en la región asiática [5-7].

Es importante resaltar que no se ha reportado ningún ensayo *push-out* a elevadas temperaturas de las conexiones tipo canal, ni se han propuesto formulaciones para la determinación de su resistencia en situación de incendio.

Dado que los ensayos *push-out* en situación de incendio constituyen una opción costosa, se hace necesario desarrollar procedimientos de modelación que permitan predecir el comportamiento térmico y estructural de las conexiones y complementar la escasa información experimental disponible, así como visualizar la necesidad y orientación de nuevos programas experimentales.

Cabe señalar que la modelación numérica basada en el método de elementos finitos, es una eficaz herramienta ampliamente utilizada en la solución de problemas en múltiples ramas del saber y en particular en el ámbito de la ingeniería civil [8-10].

Un antecedente directo del presente trabajo lo constituye la investigación desarrollada por Larrúa y Silva [11,12] en la que se realizó la modelación térmica bidimensional de los especímenes *push-out* adoptados en el programa experimental del CTICM [3] y en los ensayos realizados por Satoshi *et al.* [5], ambos casos relacionados con conexiones tipo perno en vigas no protegidas. En el segundo caso fueron considerados especímenes con una sola losa de concreto, manteniendo, como Kruppa y Zhao [3], la carga constante para diferentes niveles de carga. A diferencia de la investigación en el CTICM [3] los especímenes se sometieron a una curva de fuego estándar modificada.

Los modelos desarrollados por Larrúa y Silva [11,12] guardan una alta correspondencia con los datos experimentales disponibles, y consideran acciones y propiedades térmicas normativas, lo que les confiere un grado de generalidad que permite la aplicación de los principios considerados y el aprovechamiento de los resultados alcanzados en la valoración de otras tipologías de conexiones y situaciones de diseño.

Lo anterior se pone de manifiesto en el presente artículo, donde se realiza el análisis térmico del ensayo *push-out* a elevadas temperaturas de las conexiones tipo canal, a partir de resultados numéricos generados por el programa *SuperTempcalc* y teniendo como referencia los criterios y resultados, antes mencionados, expuestos por Larrúa y Silva [11,12] relativos a la conexión tipo perno. El análisis se realiza para dos alternativas: vigas metálicas sin revestimiento contra incendio (SR), y vigas metálicas con revestimiento contra incendio (CR). Finalmente se propone

un método simplificado que permite obtener la resistencia de las conexiones tipo canal en vigas compuestas de acero y concreto con losa maciza en situación de incendio, que considera temperaturas en el concreto definidas a través del análisis térmico del ensayo *push-out* a elevadas temperaturas y es coherente con las expresiones de cálculo de la resistencia de las conexiones tipo canal a temperatura ambiente existentes en la literatura internacional y la formulación para conexiones tipo perno a elevadas temperaturas del EN 1994-1-2 [4].

## 2. Modelación térmica

La modelación numérica es una herramienta ampliamente utilizada hasta la fecha en la solución de problemas de ingeniería estructural en situación de incendio. A su vez, numerosos estudios previos demuestran la eficacia del software *SuperTempcalc* (Temperature Calculation and Design v.5) desarrollado por FSD (Fire Safety Design, Suecia) en la modelación de problemas de transferencia de calor en ingeniería estructural [13-15]. Este programa pertenece a la familia de las aplicaciones de modelación bidimensional basadas en el método de los elementos finitos. La presente sección se dedica a exponer los criterios seguidos en la modelación térmica del ensayo *push-out* de las conexiones tipo canal en losas macizas, utilizando el citado programa de cómputo. Tanto para la modelación de las acciones térmicas como de las propiedades térmicas de los materiales, se consideran como referencia importante las consideraciones del Eurocódigo 1 Parte 1-2 (EN 1991-1-2) [16] y EN 1994-1-2 [4].

### 2.1. Acciones térmicas

El desarrollo de las temperaturas es controlado por la combinación de la transferencia de calor por convección y por radiación. El flujo neto de calor está dado por la suma del flujo neto por convección, controlado por el coeficiente de convección ( $\alpha_c$ ), y el flujo neto por radiación, controlado por la emisividad resultante ( $\epsilon_r$ ). La emisividad resultante es generalmente aproximada al producto de la emisividad del material ( $\epsilon_m$ ) y la emisividad del fuego ( $\epsilon_f$ ). En EN 1994-1-2 [4] y EN 1991-1-2 [16]  $\epsilon_f$  es tomada usualmente como 1. EN 1994-1-2 [4] considera la emisividad del acero y el concreto relacionada con las superficies de los miembros igual a 0,7.

En la concepción de la modelación desarrollada, las partes expuestas de la sección se consideran sometidas al fuego estándar ISO 834 [17], con  $\alpha_c$  igual a 25 W/m<sup>2</sup>K, y  $\epsilon_r$  igual a 0,7, según lo definido en EN 1991-1-2 [16] para la propia curva de fuego estándar. En las partes no expuestas se considera la acción de la temperatura ambiente de 20°C con  $\alpha_c$  igual a 9 W/m<sup>2</sup>K.

### 2.2. Propiedades térmicas de los materiales

La conductividad térmica y el calor específico del acero se han incluido como propiedades dependientes de la temperatura, de acuerdo con EN 1994-1-2 [4]. En el propio

código también se establece un valor de densidad independiente de la temperatura igual a  $7850 \text{ kg/m}^3$ .

La conductividad térmica del concreto de peso normal, de acuerdo con EN 1994-1-2 [4], es también una propiedad dependiente de la temperatura y debe determinarse entre el límite superior y el límite inferior definidos en ese código [4,18,19]

Por otra parte, el calor específico del concreto de peso normal se consideró como una propiedad dependiente de la temperatura y la densidad de este material se tomó como un valor independiente de la temperatura en el intervalo entre  $2300\text{-}2400 \text{ kg/m}^3$ .

### 2.3. Modelación de la geometría

Como paso previo, fue verificado por medio de la modelación numérica realizada en un plano perpendicular a la sección transversal, que la influencia de las alas en las temperaturas de los puntos relevantes del espécimen es despreciable. Por tal razón, es factible modelar la geometría del conector canal, en el plano de la sección transversal, considerando solamente las dimensiones del alma, a modo de un conector tipo perno de gran diámetro. En consecuencia tiene sentido que, a falta de experimentación específica de conexiones tipo canal a elevadas temperaturas, se tome como referencia la calibración realizada para el caso de los modelos con conectores tipo perno [11,12].

Para la geometría del conector se tomaron en cuenta secciones con valores de alturas de 76,2 mm, 101,6 mm y 127 mm y valores de anchos de 50 mm, 100 mm y 150 mm que son representativos de la gama utilizada internacionalmente en la práctica constructiva y que a su vez están presentes en los ensayos de este tipo de conexión a temperatura ambiente [1,2,20]. Los espesores de protección adoptados fueron 10 mm, 25 mm y 40 mm, lo que se considera un rango razonable, según la práctica internacional. La Fig. 1 presenta ejemplos ilustrativos de las geometrías modeladas.

### 2.4. Modelación de las condiciones de frontera

La definición de las condiciones de frontera, tal como indica la Fig. 2, incluye el contorno 1 sobre el que se considera actuando el fuego estándar [17], mientras que el contorno 2 representa la región no expuesta, en la que actúa la temperatura ambiente ( $20^\circ\text{C}$ ) asociada a un coeficiente de convección de  $9 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

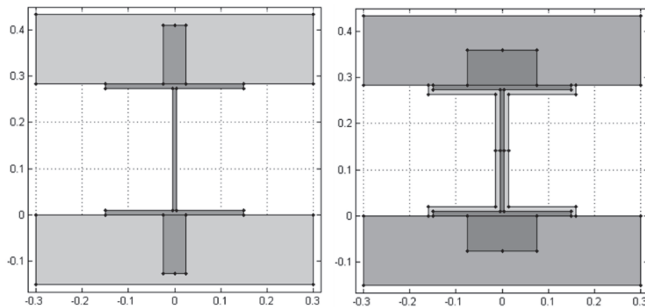


Figura 1. Modelación de la geometría. Ejemplos ilustrativos. a) 127 x 50 mm (SP), b) 76,2 x 150 mm (CP espesor = 10 mm).

Fuente: Los autores

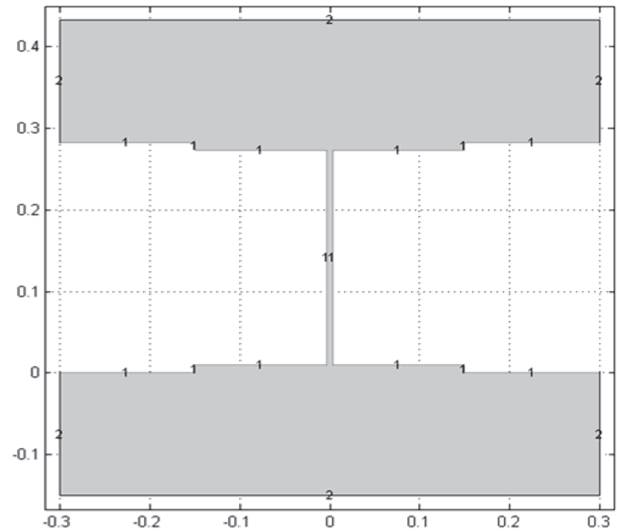


Figura 2. Condiciones de frontera.

Fuente: Los autores

### 2.5. Selección del tipo de elemento finito y la densidad de malla

Debido a que la sección transversal de los especímenes está compuesta por geometrías rectangulares en todos los casos, la malla se generó con elementos rectangulares de cuatro nodos. El tamaño del lado mayor de los elementos se definió como  $l \leq 0.01 \text{ m}$

### 2.6. Obtención de los resultados

El programa de computación SuperTempcalc ofrece la posibilidad de obtener los resultados en diferentes formatos: gráficos, tablas de Microsoft Excel y/o animaciones. Dentro de los gráficos se encuentran las isotermas que permiten apreciar la distribución de las temperaturas en el dominio para un tiempo de exposición al fuego dado.

La Fig. 3 muestra las isotermas a 30 minutos de exposición a fuego de especímenes correspondientes a las dos alternativas consideradas, sin revestimiento contra incendio y con revestimiento (de 10 mm de espesor). Se pueden apreciar las diferencias marcadas en el comportamiento térmico de ambos casos.

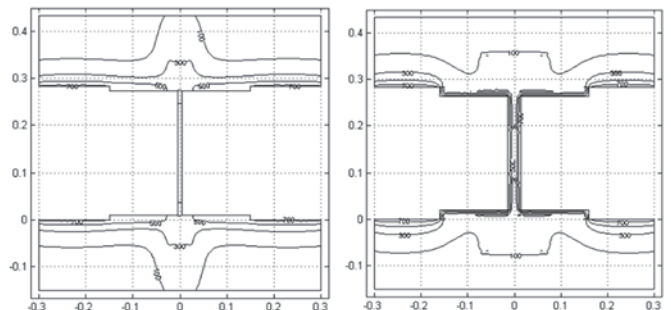


Figura 3. Isotermas a 30 minutos de exposición al fuego. a) Especimen sin revestimiento contra incendio. b) Especimen con revestimiento contra incendio con espesor de 10 mm.

Fuente: Los autores

Tabla 1.

Diseño estadístico del experimento numérico.

| Variables                | Niveles |       |     |
|--------------------------|---------|-------|-----|
| Altura del conector (mm) | 76,2    | 101,6 | 127 |
| Ancho del conector (mm)  | 50      | 100   | 150 |

Fuente: Los autores

### 3. Vigas sin revestimiento contra incendio

#### 3.1. Diseño estadístico del experimento numérico

Se realiza el diseño de experimento con el objetivo de establecer la significación de las variables independientes consideradas en la respuesta térmica de los especímenes. En la Tabla 1 se muestran las variables estudiadas y sus respectivos niveles, según un diseño factorial 32, dos factores con tres niveles cada uno.

#### 3.2. Determinación gráfica y numérica de la relación ( $\theta_c/\theta_f$ )

En la presente sección se determinan gráfica y numéricamente la relación entre la temperatura promedio del concreto ( $\theta_c$ ) y la temperatura promedio del ala ( $\theta_f$ ), en la conexión estudiada. Se consideró  $\theta_f$  como el promedio de la temperatura medida en tres puntos del ala superior del perfil,  $\theta_c$  se tomó como el promedio de las temperaturas en la región determinada por el borde del conector y el punto medio de la distancia entre el borde del ala y el conector, en dos niveles, a un cuarto de la altura del conector ( $0,25 h_{sc}$ ) medido desde su base y a la mitad de la altura de conector ( $0,5 h_{sc}$ )

Aunque las mediciones experimentales para determinar la temperatura promedio en el concreto en los ensayos *push-out* en situación de incendio se realizaron a  $0,5 h_{sc}$  [3] es razonable valorar el comportamiento de la relación  $\theta_c/\theta_f$ , cuando la temperatura promedio del concreto se determina a  $0,25 h_{sc}$ . Este nivel se seleccionó tomando en cuenta el mecanismo de fallo del conector tipo canal a temperatura ambiente, y la ocurrencia de altas temperaturas en la región situada en la cara inferior de la losa.

Las relaciones de temperatura se determinan para el intervalo de tiempo de exposición al fuego 0-30 minutos debido a que la resistencia de una viga compuesta sin protección contra incendio sometida a elevadas temperaturas no excede el entorno de los 30 minutos, y falla por otras razones ajenas al fallo específico de la conexión.

#### 3.3. Evaluación de la significación de los factores

En esta sección se valora mediante un análisis de significación la influencia de la altura y ancho del conector en el comportamiento de las relaciones  $\theta_c/\theta_f$  a  $0,25 h_{sc}$  y  $\theta_c/\theta_f$  a  $0,5 h_{sc}$  para el intervalo de tiempo de exposición al fuego de 0-30 minutos.

Con los resultados de dichas matrices, derivadas del diseño experimental, se realizan análisis estadísticos con la ayuda del paquete informático STATGRAPHICS v-15.1.02. Se demuestra que las variables independientes, altura del conector ( $h_{sc}$ ) y ancho del conector ( $b_{sc}$ ), son significativas al 95 % de confianza en las variables dependientes.

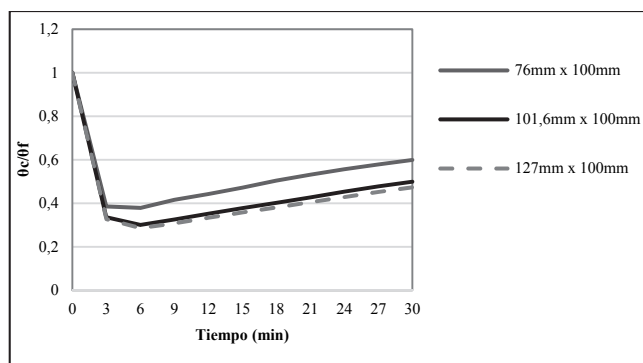


Figura 4. Comparación de la relación  $\theta_c/\theta_f$  variando la altura del conector cuando la temperatura promedio del concreto se determina a  $0,25 h_{sc}$ .

Fuente: Los autores

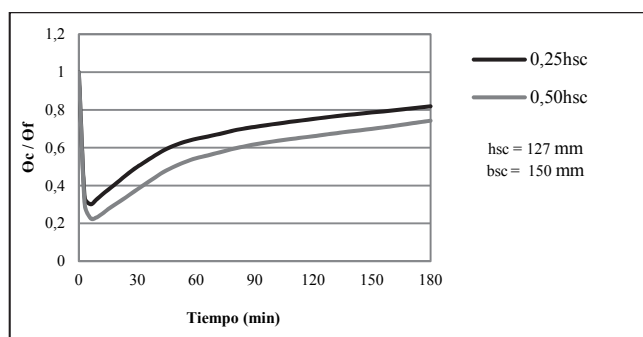


Figura 5. Comparación de la relación  $\theta_c/\theta_f$  determinada a  $0,25 h_{sc}$  y a  $0,5 h_{sc}$ .

Fuente: Los autores

En la relación  $\theta_c/\theta_f$  la influencia del ancho depende del nivel en el que se determine la temperatura promedio del concreto. Cuando la temperatura del concreto se determina a  $0,25 h_{sc}$  la influencia del ancho es muy pequeña pero cuando se determina a  $0,5 h_{sc}$  y particularmente en combinación con la mayor altura, si tiene una influencia apreciable.

La altura del conector influye considerablemente en las relaciones de temperatura las cuales son notablemente mayores en los especímenes con menor altura de conector, lo cual se puede apreciar en la Fig. 4 que ilustra su influencia en la relación  $\theta_c/\theta_f$  a  $0,25 h_{sc}$ .

En la Fig. 5 se muestra un ejemplo de como en un mismo espécimen, la relación  $\theta_c/\theta_f$  cuanto la temperatura del concreto se mide a  $0,25 h_{sc}$  es notablemente mayor a cuando se mide a  $0,5 h_{sc}$ .

Si se utiliza la relación  $\theta_c/\theta_f$  a  $0,25 h_{sc}$  para determinar la temperatura en el concreto los resultados serán mayores que si se utiliza la relación  $\theta_c/\theta_f$  a  $0,5 h_{sc}$  lo cual concuerda con lo argumentado anteriormente (en la región cercana a la base del conector los valores de temperatura en el concreto son más elevados). Debido a esto se recomienda determinar la temperatura en el concreto a partir de porcentajes de temperatura determinados en el nivel  $0,25 h_{sc}$ , de esta manera se obtienen resultados más cercanos a la realidad.

La Tabla 2 muestra los resultados de las relaciones definitivas que se proponen para el cálculo simplificado, expresadas en porcentajes, para el rango de trabajo estudiado.

Tabla 2.

Relaciones de temperatura en vigas sin revestimiento contra incendio

| Altura del conector (mm) | $\theta_c/\theta_f$ a $0,25h_{sc}$ (%) |
|--------------------------|----------------------------------------|
| 76,2                     | 55                                     |
| 100                      | 50                                     |
| 127                      | 45                                     |

Fuente: Los autores

Tabla 3. Diseño estadístico del experimento para vigas con revestimiento contra incendio

| Variables                                      | Niveles |       |     |
|------------------------------------------------|---------|-------|-----|
| Espesor del revestimiento contra incendio (mm) | 10      | 25    | 40  |
| Conductividad térmica del revestimiento (W/mK) | 0,1     | 0,2   | 0,3 |
| Altura del conector (mm)                       | 76,2    | 101,6 | 127 |
| Ancho del conector (mm)                        | 50      | 100   | 150 |

Fuente: Los autores

Se puede observar que los porcentajes para determinar la temperatura en el concreto varían en función de la altura del conector. Esto coincide con los resultados obtenidos por Larrúa y Silva [11], para conectores tipo perno.

#### 4. Vigas con revestimiento contra incendio

##### 4.1. Diseño del experimento numérico

Se realiza el diseño del experimento numérico para estudiar los factores que influyen en las relaciones de temperatura  $\theta_c/\theta_f$  en secciones compuestas con vigas con revestimiento contra incendio (CR). Se mantienen como factores de estudio la altura y el ancho del conector debido a que resultaron representativos para la sección compuesta con vigas sin revestimiento. Se consideran rangos de valores de conductividad y espesor de la protección, representativos de una amplia gama de materiales de revestimiento usualmente empleados en la práctica internacional. Para el diseño estadístico del experimento numérico y el análisis de los resultados, también fue utilizado el programa *Statgraphics XV Centurion*. Se implementó un diseño factorial multinivel para evaluar el efecto de los factores seleccionados, que arrojó un total de 81 combinaciones. Posteriormente, se realizó la optimización del diseño, utilizando los procedimientos incluidos en el citado programa, con lo que quedaron definidas 16 combinaciones. En la Tabla 3 se muestran las variables estudiadas y sus respectivos niveles.

##### 4.2. Determinación gráfica y numérica de las relaciones $\theta_c/\theta_f$

Para la determinación de las relaciones de temperatura se siguió el mismo procedimiento descrito en epígrafe 2.2 para vigas sin revestimiento contra incendio. En el caso de las vigas revestidas se determinaron las relaciones de temperatura para 4 rangos de tiempo de exposición al fuego: 0-30 minutos, 0-60 minutos, 0-90 minutos y 0-120 minutos.

##### 4.3. Evaluación de la significación de los factores

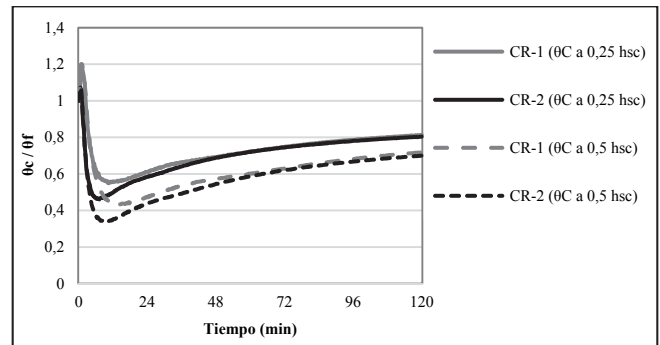
Se realizó el análisis de significación de las variables independientes para un 95 % de confianza. El factor con más

influencia en las relaciones de temperatura para todos los rangos de tiempo analizados es el espesor del revestimiento contra incendio. De igual forma que para la sección compuesta con vigas sin revestimiento contra incendio, la altura del conector es un factor significativo en las relaciones de temperatura y es el segundo con más influencia para el rango de 0-120 minutos. Otro factor que influye en gran medida es la conductividad del material de revestimiento, que es el segundo factor con más influencia en los rangos de tiempo de 0-30 minutos, 0-60 minutos y 0-90 minutos. El ancho del conector también influye en las relaciones pero en menor medida.

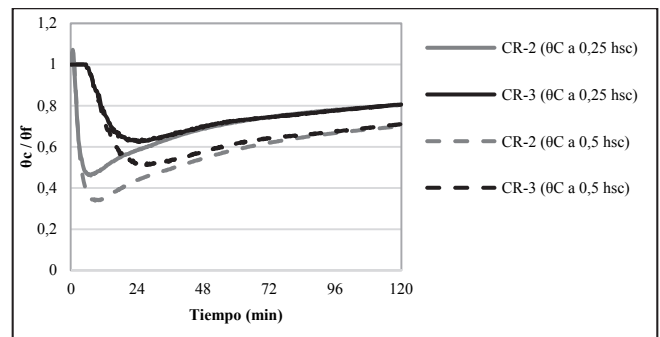
Para ilustrar la influencia de la conductividad del material de revestimiento contra incendio en las relaciones de temperatura, en la Fig. 6 se grafican las relaciones de temperatura  $\theta_c/\theta_f$  a  $0,25h_{sc}$  y  $\theta_c/\theta_f$  a  $0,5h_{sc}$  del espécimen CR-1 con conductividad igual a 0,1 W/mK y del espécimen CR-2 con conductividad igual a 0,3 W/mK, ambos con espesor del revestimiento contra incendio igual a 10 mm, altura del conector igual a 76,2 mm y ancho del conector igual a 50 mm.

Puede apreciarse claramente que la conductividad influye de forma significativa en las dos relaciones. Las relaciones de temperatura serán mayores a medida que disminuya la conductividad. La influencia de la conductividad disminuye a mayores tiempos de exposición al fuego.

En la Fig. 7 se puede apreciar mediante un ejemplo como influye significativamente el espesor del revestimiento contra incendio, en las relaciones de temperatura de dos especímenes, CR-2 y CR-3, con iguales conductividades y características geométricas de la conexión, pero con espesores de revestimiento diferentes, de 10 mm y 40 mm respectivamente.

Figura 6. Influencia de la conductividad del material de revestimiento contra incendio en las relaciones de temperatura  $\theta_c/\theta_f$  a  $0,25h_{sc}$  y  $\theta_c/\theta_f$  a  $0,5h_{sc}$ .

Fuente: Los autores

Figura 7. Influencia del espesor del material de revestimiento contra incendio en las relaciones de temperatura  $\theta_c/\theta_f$  a  $0,25h_{sc}$  y  $\theta_c/\theta_f$  a  $0,5h_{sc}$ .

Fuente: Los autores

Tabla 4.

Relaciones de temperatura para vigas con revestimiento contra incendio

| Altura del conector<br>(mm) | $\theta_c/\theta_f$ a $0,25h_{sc}$ (%) |                    |                    |
|-----------------------------|----------------------------------------|--------------------|--------------------|
|                             | Esesor de<br>10 mm                     | Esesor de<br>25 mm | Esesor de<br>40 mm |
| 76,2                        | 80                                     | 85                 | 90                 |
| 100,6                       | 75                                     | 80                 | 85                 |
| 127                         | 75                                     | 80                 | 85                 |

Fuente: Los autores

Nótese que en los primeros 30 minutos, el comportamiento de las relaciones para el espécimen que tiene espesor de revestimiento de 40 mm es acentuadamente diferente y los valores de las relaciones son notablemente superiores a los obtenidos con el modelo de espesor menor.

Debido a que todos los factores estudiados influyen en las relaciones de temperatura se realizó un análisis de regresión y se obtuvieron expresiones que permiten predecir la magnitud de las mismas. Con estas expresiones se determinaron las relaciones de temperatura para los 81 especímenes del diseño original en los rangos de tiempo de 0-30, 0-60, 0-90 y 0-120 minutos.

A los efectos de simplificar los resultados, adicionalmente se realizó un análisis de sensibilidad del impacto de los resultados en la resistencia de la conexión, lo que condujo a la propuesta final de relaciones de temperatura que se muestra en la Tabla 4, en la que se adoptan los valores mayores correspondientes a la conductividad del material de revestimiento igual a 0,1 W/mK (que conduce a mayores valores de las relaciones) y al rango de 0-120 minutos, resultado que queda del lado seguro respecto a los casos con mayores conductividades del material de revestimiento y rangos de exposición al fuego menores. Las relaciones definitivas son coherentes con los resultados propuestos por Larrúa y Silva [11].

Puede apreciarse que los porcentajes propuestos para determinar las temperaturas en el concreto, son mayores que los propuestos en el epígrafe 2.3 para vigas sin revestimiento (ver Tabla 2). Esto se debe a que en las vigas con revestimiento contra incendio, el calentamiento ocurre de forma más lenta, por lo que las temperaturas del concreto de la losa son más cercanas a la temperatura del ala del perfil. No obstante, debe tomarse en cuenta que el impacto de esos valores elevados en el diseño de la conexión se atenúa, debido a que se aplican como factor que multiplica a temperaturas promedios del ala del perfil notablemente inferiores, derivadas de la presencia del revestimiento.

## 5. Impacto de los resultados anteriores en la determinación de la resistencia

En la normatividad internacional el único método de diseño para conexiones a elevadas temperaturas es el ofrecido en EN 1994-1-2 [4], que solo incluye la conexión tipo perno.

La resistencia de la conexión se define por el menor de los siguientes valores:

$$P_{fi,Rd} = 0,8 \cdot k_{u,\theta} \cdot P_{Rd} \quad (1)$$

$$P_{fi,Rd} = k_{c,\theta} \cdot P_{Rd} \quad (2)$$

Donde:

$P_{Rd}$  = resistencia a temperatura ambiente y se obtiene del Eurocódigo 4 Parte 1 (EN 1994-1-1 [21]).

$K_{c,\theta}$  = factor de reducción de la resistencia a compresión del concreto a elevadas temperaturas, que es función de la temperatura en el concreto ( $\theta_c$ ) determinada a partir de la temperatura del ala ( $\theta_f$ ), según las relaciones  $\theta_c/\theta_f$ , expresadas en porcentajes.

$K_{u,\theta}$  = factor de reducción de la resistencia del acero a elevadas temperaturas, que es función de la temperatura en el conector ( $\theta_{sc}$ ) determinada a partir de la temperatura del ala ( $\theta_f$ ), según las relaciones  $\theta_{sc}/\theta_f$  expresadas en porcentajes.

En esta sección, se valora el impacto de los resultados presentados en los epígrafes 2.3 y 3.3 en la resistencia de las conexiones tipo canal a elevadas temperaturas.

Debido a que no existe una formulación para determinar la resistencia de las conexiones tipo canal a elevadas temperaturas, se toma como referencia el procedimiento de cálculo de las conexiones tipo perno a elevadas temperaturas de EN 1994-1-2 [4], considerando la expresión de predicción de la resistencia de las conexiones tipo canal a temperatura ambiente presente en AISC [22] por ser la más difundida internacionalmente y representar el formato más generalizado entre las formulaciones de diseño existentes para el caso. Dado que en la formulación considerada no se incluye la resistencia del acero del conector la expresión propuesta para el cálculo de la resistencia de la conexión tipo canal a elevadas temperaturas es la siguiente:

$$P_{fi,Rd} = k_{c,\theta} \cdot P_{Rd} \quad (3)$$

Donde:

$k_{c,\theta}$  es el factor de reducción de la resistencia a compresión del concreto a elevadas temperaturas, que es función de la temperatura en el concreto ( $\theta_c$ ) determinada a partir de la temperatura de ala ( $\theta_f$ ), según las relaciones  $\theta_c/\theta_f$  expresadas en porcentajes, según Tabla 2 para vigas sin revestimiento contra incendio y Tabla 4 para vigas revestidas.

$P_{Rd}$  es la resistencia de la conexión tipo canal a temperatura ambiente (en kN), que está dada por la ecuación:

$$P_{Rd} = [0,3(t_f + 0,5t_w)L_c]\sqrt{f_c E_c} \quad (4)$$

Donde:

$t_f$ : espesor del ala del conector (mm)

$t_w$ : espesor del alma del conector (mm)

$L_c$ : ancho del conector (mm)

$f_c$ : resistencia a compresión del concreto (MPa)

En la Fig. 8 se grafican curvas de resistencia de la conexión a elevadas temperaturas en función del tiempo de exposición al fuego en las que se varía la altura y el ancho del conector para dos variantes: (a) vigas sin revestimiento contra incendio y (b) vigas revestidas, en las que también se varía el espesor de revestimiento.

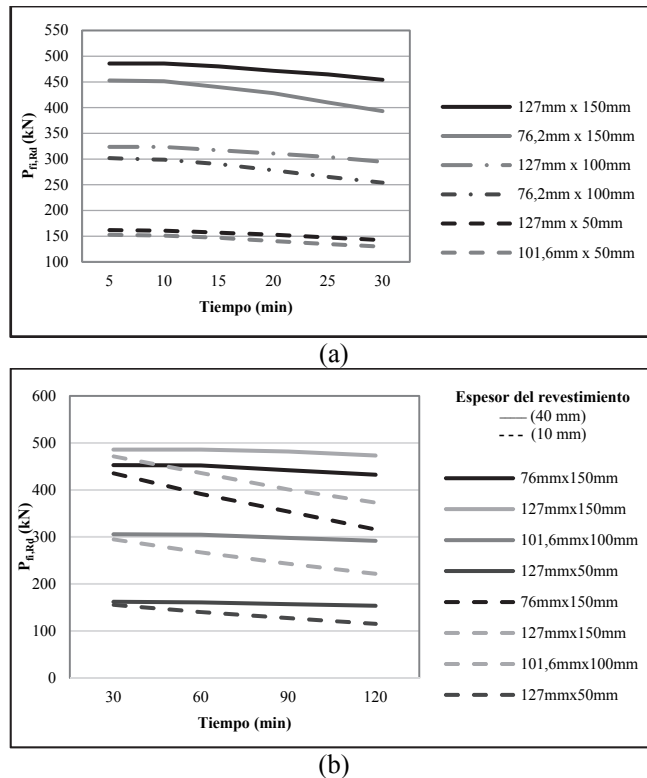


Figura 8. Curvas de resistencia a elevadas temperaturas en función del tiempo de exposición al fuego. (a) Vigas sin revestimiento contra incendio. (b) Vigas con revestimiento contra incendio.

Fuente: Los autores

Se puede observar que en ambos gráficos, la resistencia de la conexión es más baja para los especímenes con menor ancho y altura de conector. En la Fig. 8 (b) se puede observar además, que la disminución de la resistencia en función del tiempo de exposición al fuego ocurre de forma menos marcada para los especímenes con espesor de 40 mm y es más acentuada para los que tienen espesores de 10 mm.

En la Fig. 9 se muestra como varía la resistencia para el conector canal de 76,2 mm de alto, 50 mm de ancho y espesor del revestimiento contra incendio de 25 mm, en función de la resistencia del concreto y la conductividad del material de revestimiento.

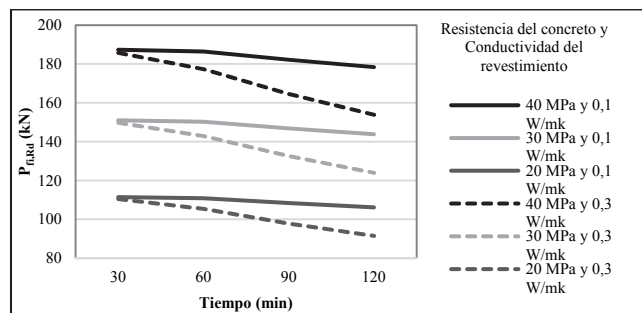


Figura 9. Comportamiento de la resistencia de la conexión a elevadas temperatura en función del tiempo de exposición al fuego para diferentes resistencias de concreto y conductividades del revestimiento contra incendio.

Fuente: Los autores

Se puede apreciar que la resistencia del concreto tiene gran influencia en la resistencia de la conexión a elevadas temperaturas, sin embargo, no influye en su decrecimiento en función del tiempo de exposición al fuego.

En cuanto a la conductividad del material de revestimiento contra incendio, la resistencia de la conexión tiene menor valor y disminuye de forma más acentuada cuando la conductividad tiene el valor máximo considerado de 0,3 W/mK.

## 6. Conclusiones

El comportamiento térmico de las dos alternativas consideradas, conexiones en vigas sin revestimiento contra incendio y en vigas con revestimiento, es marcadamente diferente, lo que conduce a que los valores de las relaciones  $\theta_c/\theta_f$  sean notablemente superiores en el segundo caso.

Con base al conjunto de resultados expuestos, se propone adoptar los valores asociados al nivel de determinación de la temperatura del concreto a un cuarto de la altura del conector, que resultan, en ambos casos, dependientes de la altura del conector como se muestra en las Tablas 2 y 4. En tanto, para vigas revestidas, las relaciones de temperatura propuestas dependen además del espesor del revestimiento contra incendio y son válidas para un rango amplio de propiedades térmicas de su material componente.

El método simplificado propuesto toma en cuenta los porcentos derivados del análisis térmico, que relacionan la temperatura en el concreto con la temperatura en el ala del perfil de acero, al tiempo que resulta coherente con las expresiones de cálculo existentes de la resistencia de las conexiones tipo canal a temperatura ambiente y la formulación para conexiones tipo perno a elevadas temperaturas del EN 1994-1-2 [4].

## Agradecimientos

Los autores desean agradecer a CAPES (Coordenação de aperfeiçoamento de pessoal de nível superior), a FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) y a CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), por el apoyo brindado para el desarrollo de la investigación.

## Referencias

- [1] Pashan, A., Behaviour of channel shear connectors: Push-out tests, MSc. Thesis, Department of Civil and Geological Engineering, University of Saskatchewan, Canada, 2006.
- [2] Ramírez, O., Larrúa, R., Vargas, R., Yeomans, F. y Pinto, M. Informe del proyecto SENACYT COL 06-007: Fundamentación experimental de sistemas estructurales y productos para el desarrollo competitivo de la construcción compuesta, 2010, 34 P.
- [3] Kruppa, J. and Zhao, B., Fire resistance of composite slabs with profiled steel sheet and composite steel concrete beams. Part 2: Composite Beams. ECSC Agreement No 7210 SA 509, 1995, 63 P.
- [4] European Committee for Standardization. Eurocode 4. Design of composite steel and concrete structures. Part 1.2: General rules-Structural fire design. EN 1994-1-2, 2005.
- [5] Satoshi, S., Michikoshi, S., Kobayashi, Y. y Narihara, H., Experimental study on shear strength of headed stud shear connectors

- at high temperature. *J. Struct. Constr. Eng. AIJ*, 73 (630), pp. 1417-1433, 2008. DOI: 10.3130/aijs.73.1417
- [6] Choi, S.-K., Han, S.-H., Kim, S.-B., Nadjai, A., Faris, A. and Choi, J.-Y., Performance of shear studs in fire. Application of structural fire engineering, Proceedings of International Conference, Prague, pp. 490-495, 2009.
- [7] Chen, L., Li, G. and Jiang, S., Experimental studies on the behaviour of headed studs shear connectors at elevated temperatures. Proceedings of the Seventh International Conference of Structures in Fire. Zurich, Switzerland, pp. 257-266, 2012.
- [8] Starossek, U., Falah, N. and Löhning, T., Numerical analyses of the force transfer in concrete-filled steel tube columns, *Structural Engineering and Mechanics*, 35 (2), pp. 241-256, 2010. DOI: 10.12989/sem.2010.35.2.241
- [9] Lam, D. and Ellobody, E., Behavior of headed stud shear connectors in composite beam, *Journal of Structural Engineering*, 131 (1), pp. 96-106, 2005. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2005)131:1(96)
- [10] Rodríguez, W. and Pallares, M.R. Three-dimensional modeling of pavement with dual load using finite element. *DYNA*, 82 (189), pp. 30-38, 2015. DOI: 10.15446/dyna.v82n189.41872.
- [11] Larrua, R. and Silva, V.P., Thermal analysis of push-out tests at elevated temperatures. *Fire Safety Journal*, 55, pp. 1-14, 2013. DOI: 10.1016/j.firesaf.2012.08.009
- [12] Larrua, R. y Silva, V.P., Modelación térmica del ensayo de conexiones acero-concreto a elevadas temperaturas. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*, 36, pp. 1-9, 2013.
- [13] Anderberg, Y., SUPER-TEMPALC. A commercial and user friendly computer program with automatic FEM-generation for temperature analysis of structures exposed to heat, *Fire Safety Design*. Lund, 1991.
- [14] Silva, V.P., Determination of the steel fire protection material thickness by an analytical process—a simple derivation. *Engineering Structures*, 27, pp. 2036-2043, 2005. DOI: 10.1016/j.engstruct.2005.05.018
- [15] Correia, A.M., Rodrigues, J.P., Silva, V.P. A simplified calculation method for temperature evaluation of steel columns embedded in walls. *Fire and Material Journal*, 35, pp. 431- 441, 2011. DOI: 10.1002/fam.1063
- [16] European Committee for Standardization. Eurocode 1. Actions on structures, Part 1-2: General actions - actions on structures exposed to fire. EN 1991-1-2. 2002.
- [17] International Organization for Standardization. Fire-Resistance Tests. Elements of Building Construction, Part 1.1: General Requirements for Fire Resistance Testing. Geneva. ISO 834.1990. (Revision of first edition ISO 834:1975).
- [18] Anderberg, Y. Background documentation for thermal conductivity of concrete. In: BDA 3.1. CEN/TC250/SC2. CEN/TC 250/SC 2/PT 1-2. Doc. N 150. 2001.
- [19] Schleich, J.B. Properties of the materials. In: Implementation of Eurocodes. Design of buildings for the fire situation. Handbook 5. KI CTU/CAIT/RWTH/IET/UOP/TNO/IMK/BRE. Leonardo da Vinci Pilot Project CZ/02/B/F/PP-134007, Luxembourg, 1-28, 2005.
- [20] Maleki, S., Bagheri, S. Behavior of channel shear connectors, Part I: experimental study. *Journal of Constructional Steel Research*, 64, pp. 1333-1340, 2008. DOI: 10.1016/J.JCSR.2008.01.006. DOI: 10.1016/J.JCSR.2008.01.010
- [21] European committee for standardization. Eurocode 4. Design of composite steel and concrete structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings. EN 1994-1-1. 2004.
- [22] American Institution of Steel Construction, AISC: Specification for Structural Steel Buildings, Chicago, 2010.

**Y. Larrúa-Pardo**, se graduó de Ing. Civil en el año 2004 y de MSc. en Conservación de Centros Históricos y Rehabilitación del Patrimonio Edificado en el año 2008. Actualmente es profesora asistente de la Facultad de Construcciones e investigadora del Centro de Estudio CECODEC de la Universidad de Camagüey, Cuba. Su línea de investigación actual es acerca del comportamiento y diseño de estructuras compuestas en situación de incendio.

**R. Larrúa-Quevedo**, se graduó de Ing. Civil en el año 1980 y de Dr. en Ciencias Técnicas en el año 1992. Realizó estudios de Pos-doctorado en la Universidad Politécnica de Cataluña, España y en la Universidad de São Paulo, Brasil. Actualmente es profesor titular de la Universidad de Camagüey, Cuba y líder del Grupo de Estructuras del Centro de Estudio CECODEC de la Universidad de Camagüey, Cuba. Investiga en el área de ingeniería de estructuras, con énfasis en las estructuras compuestas y en el diseño estructural en situación de incendio.

**V.P. Silva**, concluyó el Dr. en Ing. Civil - Estructuras en 1997, en la Escuela Politécnica de la Universidad de São Paulo (USP), Brasil. Realizó estudios de Pos-doctorado en la Universidad de Coímbra. Es Profesor Doctor de la Poli-USP. Revisor de 19 revistas científicas. Investiga en el área de Ingeniería de Estructuras, con énfasis en la ingeniería estructural en situación de incendio. Es líder del Grupo de Investigaciones en seguridad estructural contra incendio de la USP. Es Vicepresidente de ALBRASCI y miembro de la IAFSS, IBRACON, ABECE e GSI/USP.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN

FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería Civil

Oferta de Posgrados

Especialización en Vías y Transportes  
Especialización en Estructuras  
Maestría en Ingeniería - Infraestructura y Sistemas  
de Transporte  
Maestría en Ingeniería – Geotecnia  
Doctorado en Ingeniería - Ingeniería Civil

Mayor información:

E-mail: asisacic\_med@unal.edu.co

Teléfono: (57-4) 425 5172

## Integration model of collaborative supply chain

Horacio Bautista-Santos <sup>a</sup>, José Luis Martínez-Flores <sup>b</sup>, Gregorio Fernández-Lambert <sup>c</sup>,  
María Beatriz Bernabé-Loranca <sup>d</sup>, Fabiola Sánchez-Galván <sup>e</sup> & Neyfe Sablón-Cossío <sup>f</sup>

<sup>a</sup> Centro de Estudios de Posgrado, Instituto Tecnológico Superior de Tantoyuca, Veracruz, México. [horacio\\_bautista@hotmail.com](mailto:horacio_bautista@hotmail.com)

<sup>b</sup> Centro de Estudios de Posgrado, Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, Puebla, México. [jose Luis.martinez01@upaep.mx](mailto:jose Luis.martinez01@upaep.mx)

<sup>c</sup> Centro de Estudios de Posgrado, Instituto Tecnológico Superior de Mianla, Veracruz, México. [gfernandezl@itsm.edu.mx](mailto:gfernandezl@itsm.edu.mx)

<sup>d</sup> Facultad de Ciencias de la Computación, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla México. [beatriz.bernabe@gmail.com](mailto:beatriz.bernabe@gmail.com)

<sup>e</sup> Centro de Estudios de Posgrado, Instituto Tecnológico Superior de Tantoyuca, Veracruz, México. [fsgalvan@hotmail.com](mailto:fsgalvan@hotmail.com)

<sup>f</sup> Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad Estatal Amazónica, Pastaza, Ecuador. [nsablancossio@gmail.com](mailto:nsablancossio@gmail.com)

Received: November 18<sup>th</sup>, 2014. Received in revised form: July 21<sup>th</sup>, 2015. Accepted: September 7<sup>th</sup>, 2015.

### Abstract

The strategic members of collaborative supply chain have been looking for actions to synchronize their links. The purpose is to improve the customer service and fulfill the challenges of the globalized competitiveness. This trend is known as integrated supply chain and improves the companies performance as a whole. In this paper, an integration model of collaborative supply chain was developed considering the strategical, tactical and operational perspectives. To implement it, a measurement instrument was designed and validated statistically. Also a mathematical model using fuzzy logic was designed and applied among 36 small, medium and large Mexican companies to determine their integration level and propose specific actions that allow them to improve it.

**Keywords:** integrated supply chain; levels of integration; integration model.

## Modelo de integración de cadenas de suministro colaborativas

### Resumen

Los integrantes estratégicos de las cadenas de suministro colaborativas han buscado realizar acciones conjuntas que les permitan sincronizar los eslabones, para mejorar el servicio al cliente y hacer frente a los retos de competitividad globalizada del entorno actual; esta tendencia se conoce como integración de la cadena de suministro y permite mejorar el desempeño de las empresas en su conjunto. En este trabajo se presenta un modelo de integración de cadenas de suministro colaborativas considerando las perspectivas estratégica, táctica y operativa. Para su implementación se diseñó un instrumento de medición, el cual fue validado estadísticamente y se formuló un modelo matemático utilizando lógica difusa para su resolución. El modelo se aplicó en 36 empresas mexicanas entre pequeñas, medianas y grandes, determinando su nivel de integración, con base en los resultados se propusieron acciones específicas a implementar para mejorar el nivel alcanzado.

**Palabras clave:** cadena de suministro integrada; niveles de integración; modelo de integración.

### 1. Introducción

La cadena de suministro (CS) es una red de proveedores, fábricas, almacenes, centros de distribución y ventas al por menor; a través de los cuales se adquieren y se transforman las materias primas, para entregar al cliente productos o servicios [1].

El objetivo de la integración de la cadena de suministro (ICS) es sincronizar los requerimientos del cliente con los

flujos de materiales de los proveedores, con el fin de efectuar un balance entre el servicio al cliente, la inversión en inventarios y el costo unitario del producto. El diseño y la operación de una CS eficaz, son de importancia fundamental para todas las empresas [2].

En un nivel, la ICS se ocupa de cuestiones estratégicas, tales como la integración de los procesos de negocio internos y externos, el desarrollo de vínculos estrechos entre los socios del canal, y la gestión de los productos y la

información a medida que avanzan a través de fronteras organizativas y empresariales; en otro nivel, la ICS también puede ser una herramienta táctica y operativa aplicada a la gestión de las actividades operacionales en curso. Estas actividades pueden incluir: el servicio al cliente, el control de los flujos de entrada y salida de materiales e información, la eliminación de las ineficiencias de los canales y los costos, que se extienden desde la adquisición de materias primas hasta la fabricación, distribución, consumo y el retorno final a través del canal por medio de reciclaje o eliminación [1].

Las funciones tácticas y operativas de toma de decisiones se integran a través de la CS y se monitorean frecuentemente a través de indicadores de desempeño específico, acordados por los integrantes clave de cada CS, para determinar el correcto funcionamiento de la misma y retroalimentar el proceso con base en los resultados obtenidos.

En este trabajo se presenta el diseño e implementación de un modelo de ICS que contempla la integración a nivel estratégico, táctico y operativo. El artículo está estructurado de la siguiente manera: en primera instancia se presenta la introducción, en la segunda sección se realiza la revisión de literatura para conceptualizar el sustento teórico del presente trabajo. En el tercer apartado se hace referencia a los materiales y métodos, donde se detallan la metodología de la investigación y las herramientas científicas utilizadas. En la sección cuatro se describen los resultados y se realiza la discusión de los mismos. Como último apartado se exponen las conclusiones del estudio; se incluyen también las referencias bibliográficas consultadas.

## 2. Revisión de literatura

Se requieren cuatro premisas principales para la ICS: compartir información, colaborar para un pronóstico común, realizar una planeación común y automatizar las transacciones financieras. Asimismo, se necesitan herramientas categorizadas en las siguientes cinco clases: en el manejo de información acerca de los flujos de materiales gestionados por excepciones en tiempo real, compartir documentos en tiempo real, pronóstico colaborativo, planeación colaborativa e implementación de pagos automáticos [3].

Algunos de los logros que brinda una integración exitosa de la CS son, entre otros: una colaboración genuina entre todas las partes de la CS, con información y recursos compartidos; costo más bajo debido a operaciones equilibradas, menor nivel de inventarios, economías de escala, la eliminación de actividades que no agregan valor. Asimismo, se mejora el rendimiento debido a pronósticos más precisos, una mejor planificación y la mejora del flujo de materiales; mejor servicio al cliente, con tiempos de entrega más cortos, entregas más rápidas y mayor nivel de personalización. También se logra una mayor flexibilidad, permitiendo a las organizaciones reaccionar más rápido a las condiciones cambiantes; procedimientos estandarizados, evitando la duplicación de esfuerzos, información y planificación entre otros. Se obtiene una calidad confiable y una menor cantidad de inspecciones con programas de gestión de calidad integrados [4].

Desde una perspectiva de economía de la empresa, la

tarea de la ICS requiere de la coordinación de materiales, la información y los flujos financieros con el fin de cumplir las demandas de los clientes; el objetivo es la mejora de la competitividad, generando un plan integrado de la CS en su conjunto. La planeación a largo plazo es el objetivo estratégico para el diseño de la CS, contempla la cooperación, localización de planta, sistemas de producción, la distribución física de planta, entre otros; las tareas de planificación a mediano plazo están cubiertas por compras, planeación de requerimientos de materiales, la demanda (pronóstico) e inventarios; la planificación a corto plazo contempla la planificación del transporte, la distribución y programación de la producción [5].

La ICS se desarrolla desde la etapa de negociación hasta la etapa de colaboración. Las negociaciones de mercado, que incluyen discusiones enfocadas hacia el precio y las relaciones entre socios y adversarios; la asociación donde se establecen acuerdos económicos; la cooperación que busca establecer contratos a largo plazo con pocos proveedores; la coordinación del intercambio con apoyo de las TIC; la colaboración, donde se manifiesta la integración de la cadena, se realiza la planificación conjunta y se comparte la tecnología. [6,7].

Las negociaciones son fundamentales en todos los eslabones de la CS, ya que garantizan la eficiencia en el movimiento de mercancías y productos. Es importante considerar variables tales como los volúmenes de suministro y compra en los diferentes niveles de la cadena. En las cadenas tradicionales, la negociación era considerada como un proceso largo y delicado; en la actualidad esta tarea se ha simplificado debido al uso de las tecnologías de la información, las cuales han permitido el desarrollo de modelos informáticos que permiten administrar estratégicamente la cadena. Existen diferentes técnicas y métodos para solucionar el problema de la negociación dentro de la cadena, por ejemplo el sistema multi-agentes (SMA), es un sistema que está compuesto por múltiples agentes inteligentes que interactúan entre ellos, los agentes que intervienen pueden realizar negociaciones y llegar a acuerdos entre otros, se obtienen mejoras en el servicio y el nivel de beneficios de los miembros de la CS [8-12].

La asociación entre empresas representa toda vinculación temporal por contratos especiales o por colaboración económica, que introduce a acciones coordinadas o a tareas propias de comportamiento como grupo económico. La mayoría de las asociaciones entre empresas están directamente vinculados a las actividades básicas de las empresas (comprar para producir y vender) o centradas en las actividades de la CS o sector al que pertenecen. La asociación se constituye con el fin de lograr un mejor desarrollo de proyectos, servicios o suministros, pudiéndose agrupar tanto sociedades como empresarios individuales [13].

La cooperación implica la alineación de los integrantes de la CS hacia un objetivo común y un propósito compartido; la cooperación no sugiere una estrecha relación de trabajo operativo, sino más bien una actitud positiva hacia los demás integrantes de la cadena. Empujadas por la globalización y el consiguiente aumento de la competencia, las diferentes empresas que integran las CS han entendido la importancia del intercambio de información, la toma de decisiones

conjunta y la cooperación; y por consiguiente, la forma de sincronizar las actividades locales a través de los procesos globales y la forma de establecer una relación de colaboración en la CS, permitiendo identificar disfunciones en el proceso de cooperación, sobre todo cuando están involucradas empresas grandes y pequeñas [14-16].

Por coordinación se identifica el grado y forma de interrelación de las diferentes actividades de la CS. La coordinación se basa en una situación de ganar-ganar para todas las partes involucradas. Un mínimo grado de coordinación indica autonomía e independencia de las actividades en cada lugar, contradiciendo en parte la propia naturaleza de la empresa global. Por el contrario, un alto grado de coordinación será mayor cuanto más elevado sea el grado de globalización de la empresa. Los modelos de coordinación más comunes funcionan bajo esquemas centralizados o descentralizados, activados con mecanismos de coordinación implícitos o explícitos. Los llamados mecanismos de coordinación son aplicados para lograr minimizar los costos totales de la CS [17-21].

La colaboración se basa en el intercambio de información, de funciones, de conocimiento y procesos de negocio, con el objetivo de crear una ventaja competitiva para todos los participantes de la comunidad de negocio en la CS, incluye empleados, clientes, proveedores y socios [22]. La colaboración entre los socios comienza cuando llegan a interiorizar que el éxito de cada uno de los miembros depende de los otros, y de cómo se logra satisfacer al cliente final [7,23]. Frente a la competencia global intensificada, las empresas se esfuerzan para lograr una mayor colaboración en la CS mediante el aprovechamiento de los recursos y el conocimiento de los principales proveedores y clientes valiosos (integrantes estratégicos de la CS) para reducir la incertidumbre, minimizar costos de operación, intercambio de información, aprovechar las oportunidades para el aprendizaje, la creación de conocimiento y mejorar la posición competitiva [24,25].

La colaboración implica una coordinación simultánea de las decisiones efectuadas por centros decisionales del mismo nivel temporal (integración espacial) y por centros decisionales de niveles temporales diferentes (integración temporal) [26]. La colaboración en la CS es una estrategia que permite mejorar el desempeño de las empresas, las cuales mediante acciones conjuntas logran obtener sinergias que las llevan a reducir costos, mejorar la satisfacción de los clientes y hacer frente a los retos de competitividad requeridos para ser exitosos en el entorno actual [7,27]. Como el enfoque último de los niveles de integración de una cadena de suministro, la colaboración se distingue por los tipos de objetos que se intercambian entre los distintos dominios en que se establecen los planes colaborativos, se hace énfasis en compartir información concerniente a: planes y estrategia de negocios conjuntos, objetivos, contratos, proveedores, compras, inventarios, demanda (pronósticos), distribución, rutas, clientes, indicadores y las excepciones que puedan presentarse a los contratos [7,25,28].

### 3. Materiales y métodos

Este trabajo se llevó a cabo en 5 etapas: (1) revisión literaria acerca de la ICS (visto en el apartado dos de este

documento), (2) diseño del modelo de integración, (3) estructuración y validación de un cuestionario que se utiliza para alimentar el modelo diseñado, (4) implementación de la solución del modelo utilizando lógica difusa y (5) aplicación del modelo en distintas empresas.

#### 3.1. Diseño del modelo de integración de cadenas de suministro colaborativas

A partir de la revisión bibliográfica se definieron los factores para cada una de las dimensiones que integran la medición del nivel de integración de la CS colaborativa: integración estratégica, integración táctica, integración operativa y retroalimentación (Fig. 1). La integración estratégica contempla: la estrategia de la empresa, la información, los planes y los contratos. La integración táctica toma en cuenta el pronóstico de la demanda, los proveedores, las compras y los inventarios. La integración operativa incluye la distribución y las rutas. La medición del desempeño (retroalimentación) incluye los indicadores y las excepciones encontradas a los contratos.

A partir de las dimensiones mostradas en la Fig. 1 y los factores (variables) relacionados con cada una de las mismas, se formuló el modelo de ICS colaborativas propuesto, conformado por una entrada, un proceso y una salida (Fig. 2); además, se definieron las métricas para la medición de cada una de las variables utilizadas en el modelo (Anexo 1).

**a. Entrada:** considera la CS que se evaluará, donde existe una empresa central que busca integrar todos los procesos y actores a su estrategia, objetivos y planes; para lo cual es necesario que se realicen acuerdos, se comparta información con los integrantes estratégicos de la cadena y se determine en dónde empieza y termina la misma, lo anterior para definir la cantidad de actores y eslabones. Se tiene como entrada también un cuestionario que sirve de información para alimentar el modelo.

**b. Proceso:** en este bloque se definen tres etapas del proceso de integración de la cadena:

- Nivel estratégico: tiene que ver con la planeación a largo plazo y contempla la estrategia del plan de negocios de la empresa, los objetivos, el determinar y regular el flujo de información, definir los planes de colaboración y las cláusulas de los contratos a realizar con los integrantes estratégicos de la CS.
- Nivel táctico: es alimentado por el nivel estratégico y contempla la planeación a mediano plazo, incluye el pronóstico de la demanda, los proveedores y su

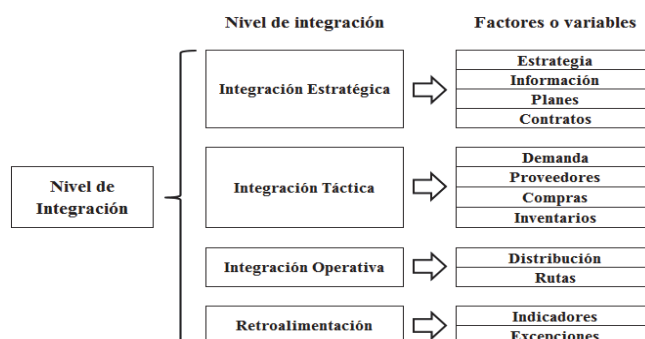


Figura 1. Niveles de integración y factores/variables considerados.

Fuente: Los Autores.

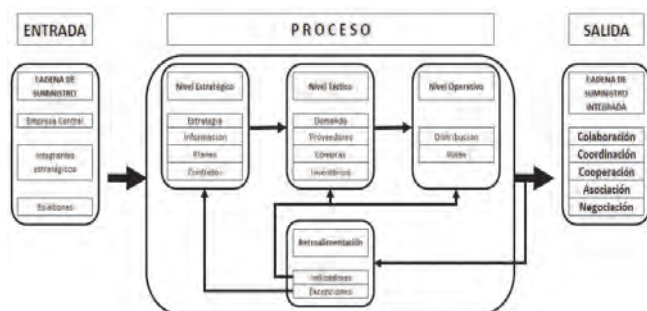


Figura 2. Modelo de ICS colaborativas propuesto.

Fuente: Los Autores.

desempeño, la planeación de las compras y su relación con los niveles de inventarios. La salida alimenta al nivel operativo.

- Nivel operativo: Considera la distribución de las mercancías y su trazabilidad dentro de la CS; así mismo, considera también el ruteo de vehículos.

**c. Salida:** muestra el nivel de ICS, determinando si se encuentra en la etapa de negociación, asociación, cooperación, coordinación o colaboración. La salida también proporciona información sobre los indicadores estratégicos de la CS y las excepciones encontradas a los contratos establecidos. El modelo se retroalimenta y los indicadores se utilizan para corregir las desviaciones a nivel táctico y operativo, mientras que las excepciones encontradas retroalimentan el nivel estratégico.

La aplicación de este modelo de ICS permitirá a nivel estratégico: mejorar la estrategia y el plan de negocios conjunto entre los integrantes estratégicos de la CS, definir y optimizar el flujo de información, integrar y mantener actualizados los planes y contratos realizados.

A nivel táctico: mejorar la precisión del pronóstico de la demanda, optimizar el proceso de adquisición, reducir los inventarios, lograr ciclos de reposición más rápidos, mejor comunicación y respuesta con los proveedores y disminuir los costos logísticos.

A nivel operativo: mejorar la planificación de la distribución de las mercancías, conocer la ubicación de su mercancía dentro de la CS, optimizar las rutas de distribución de mercancías y disminuir las demoras en el cumplimiento de órdenes.

### 3.2. Estructuración y validación del instrumento de medición

Se diseñó un instrumento de medición a manera de cuestionario para evaluar el nivel de ICS (Anexo 1), mismo que considera cada una de las variables utilizadas en el modelo propuesto; se retroalimentó con expertos del área académica de los países de México y Cuba con estudios de doctorado en Logística, CS e Ingeniería Industrial; así como por personal del área de Logística y CS de algunas de las empresas encuestadas.

El instrumento de medición se dividió en 3 secciones, la primera consta de información general de la empresa encuestada y del responsable del llenado de la misma,

también permite conocer entre otras cosas el sector en que se desempeña la empresa, perfil del encuestado, tiempo de permanencia en el mercado, si se cuenta con un plan de negocios establecido y contratos con clientes y proveedores.

En la segunda sección se encuentra el cuestionario que sirve como entrada al modelo de ICS desarrollado, consta de 18 preguntas de opción múltiple con una escala ordinal de cinco niveles, que permiten al encuestado ubicar rápidamente a su empresa en una etapa de integración por cada variable específica. La tercera sección permite al responsable del llenado del instrumento, escribir comentarios que han servido de retroalimentación para mejorar el mismo.

Para su aplicación se desarrolló un programa escrito en lenguaje Java, que permitió enviarlo por correo electrónico a distintas empresas; la herramienta válida que todas las preguntas sean contestadas y que se devuelvan las respuestas de forma automática.

La metodología utilizada para determinar la validez y confiabilidad del instrumento de medición fue en primera instancia, evaluar la confiabilidad del instrumento mediante el estadístico alfa de Cronbach (alfa); después se realizó la evaluación de la validez mediante un análisis factorial, con los resultados se reestructuró el cuestionario y se realizaron las adecuaciones al modelo de ICS propuesto [29].

El estadístico alfa brinda una medida de confiabilidad de consistencia interna, es el promedio de todos los coeficientes posibles de división por mitades que resultan de las diferentes divisiones de los reactivos de la escala. El método de cálculo requiere una sola aplicación del instrumento de medición, se realiza la medición y se calcula el coeficiente. [30,31].

La validez del instrumento se realizó a través de un análisis de factores, que nos indica cuántas dimensiones integran a una variable y qué reactivos conforman cada dimensión. El análisis factorial es una técnica de reducción de datos que sirve para encontrar grupos homogéneos de variables a partir de un conjunto numeroso de variables; los reactivos que no pertenezcan a una dimensión, quiere decir que están “aislados” y no miden lo mismo que los demás; por tanto, deben eliminarse. [30,31].

### 3.3. Implementación de la solución del modelo utilizando lógica difusa

La gestión eficiente de una CS para cumplir con el nivel de servicio requerido por el cliente es muy difícil, ya que existen diversas fuentes de incertidumbre y complejas interrelaciones en los distintos niveles entre sus integrantes; además, el diseño de las redes de las CS es una tarea difícil debido a la complejidad intrínseca de los principales subsistemas de estas redes y las muchas interacciones entre estos subsistemas. Se encuentra incertidumbre en el suministro, que está relacionada con el desempeño de los proveedores debido a los retrasos en las entregas o materias primas fuera de especificaciones; incertidumbre resultante de los procesos de producción dentro de las empresas y, la incertidumbre en la demanda de productos debido a un pronóstico inexacto [32-35].

La lógica difusa tiene sus raíces en la teoría de conjuntos difusos desarrollada por Zadeh en la década de los 60's; dicha teoría propone que un elemento siempre pertenece en un

cierto grado a un conjunto y nunca pertenece del todo al mismo, esto permite establecer una manera eficiente para trabajar con datos inciertos o con conocimiento subjetivo, así como para acondicionar el conocimiento en forma de reglas lingüísticas hacia un plano cuantitativo; los más populares sistemas de lógica difusa son Mamdani y Takagi–Sugeno.

Como una forma de resolver los retos de la gestión y administración en las CS, han surgido teorías, enfoques y metodologías que utilizan herramientas como la lógica difusa para obtener soluciones confiables que se adapten a los cambios de los parámetros de la imprecisión [36–40].

La lógica difusa tiene dos grandes componentes: funciones de membresía y reglas difusas, mediante su uso es posible representar expresiones lingüísticas como expresiones matemáticas; lo anterior es muy útil cuando es necesario modelar la experiencia de un experto [41]. Las funciones de pertenencia nos indican el grado en que cada elemento de un universo dado, pertenece a dicho conjunto; es decir, la función de pertenencia de un conjunto A sobre un universo X será de la forma:  $\mu_A: X \rightarrow [0,1]$ , donde  $\mu_A(x) = r$ , si r es el grado en que x pertenece a A. En la ec. (1) se muestra la función de pertenencia para un conjunto difuso triangular.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ (x - a)/(m - a), & x \in (a, m] \\ (b - x)/(b - m), & x \in (m, b) \\ 1, & x \geq b \end{cases} \quad (1)$$

Para aplicarse en distintos entornos, las funciones de pertenencia pueden tomar diferentes formas de acuerdo a la experiencia y preferencias del diseñador. A la hora de determinar una función de pertenencia, normalmente se eligen funciones sencillas, para que los cálculos no sean complicados; las más utilizadas son las funciones triangulares y las trapezoidales. En la Fig. 3 se muestra la gráfica de una función de pertenencia triangular para un conjunto difuso dado.

Esencialmente, un sistema difuso es una estructura basada en conocimiento, definida a través de un conjunto de reglas difusas del tipo SI–ENTONCES (antecedente y consecuente); las cuales, contienen una cuantificación lógica difusa de la descripción lingüística del experto. En este trabajo se hizo uso de la función triangular debido a la naturaleza de las variables utilizadas, ya que es la función que mejor se ajustó a los datos de entrada y salida del modelo. Se utilizó el sistema de lógica difusa tipo Mamdani porque tanto

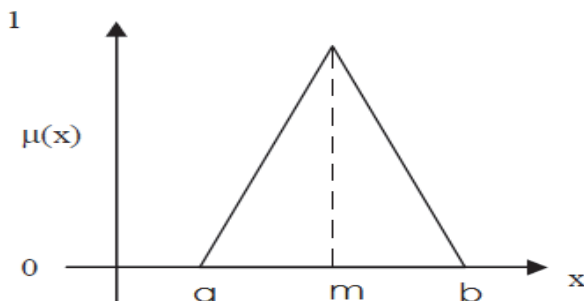


Figura 3. Función de pertenencia triangular para un conjunto difuso. Fuente: [41].

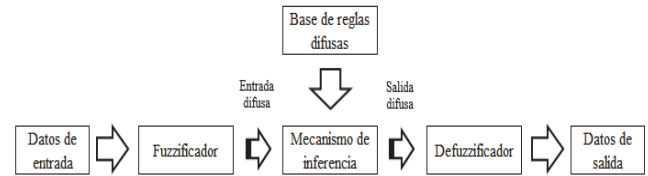


Figura 4. Sistema de lógica difusa tipo Mamdani. Fuente: [41].

el antecedente como el consecuente de las reglas están dadas por expresiones lingüísticas [42,43].

El sistema tipo Mamdani (Fig. 4) está compuesto de cuatro bloques:

**Fuzzificador:** las entradas del sistema Mamdani son valores normalmente numéricos, que provienen de algún tipo de sensor o son resultados de un proceso; para poder operar este valor, los sistemas Mamdani traducen dicho valor en un valor “difuso” que puede ser operado por los mecanismos de inferencia. Esta traducción es realizada por el fuzzificador, que convierte los valores numéricos en valores difusos que representan el nivel de pertenencia de las diferentes variables del sistema en cada conjunto difuso.

**Base de reglas difusas:** es la forma en que los sistemas difusos Mamdani representan la experiencia y el conocimiento lingüístico para resolver el problema. Es un conjunto de sentencias SI–ENTONCES que contiene dos partes: antecedente y consecuente (expresiones lingüísticas).

**Mecanismo de inferencia:** una vez que el fuzzificador ha traducido los valores difusos, éstos tienen que ser procesados para generar una salida difusa. La tarea del mecanismo de inferencia es tomar valores difusos y generar una salida difusa basada en una base de reglas difusas.

**Defuzzificación:** la salida de inferencia del sistema es una salida difusa, por lo que no puede ser interpretada por un elemento externo que sólo opere datos numéricos. Para hacer posible la utilización de estos datos, la salida se traduce a un formato numérico por el defuzzificador, usando los procedimientos del centro de gravedad o centros promediados.

La etapa de fuzzificación del modelo de ICS, se muestra en el diagrama de bloques de la Fig. 5. Se puede apreciar que la integración estratégica está dada por la combinación de los factores estrategia, información, planes y contratos, que a su vez son alimentadas por los resultados del cuestionario aplicado a las empresas para tal fin; así mismo, se puede ver cómo quedan definidas la integración táctica, la integración operativa y la retroalimentación del modelo.

El nivel global de la cadena de suministro es mostrado en la Fig. 6; está constituido por las salidas difusas de la integración estratégica, táctica, operativa y la retroalimentación, dando como resultado un valor difuso que se convierte a valor lingüístico (defuzzificación) y nos indica si la CS está en el nivel de negociación, asociación, cooperación, coordinación o colaboración, según sea el resultado específico de la valoración realizada.

Las reglas difusas son un modo de representar estrategias o técnicas apropiadas cuando el conocimiento proviene de la experiencia o de la intuición, están compuestas por variables lingüísticas que forman la premisa de la condición y una

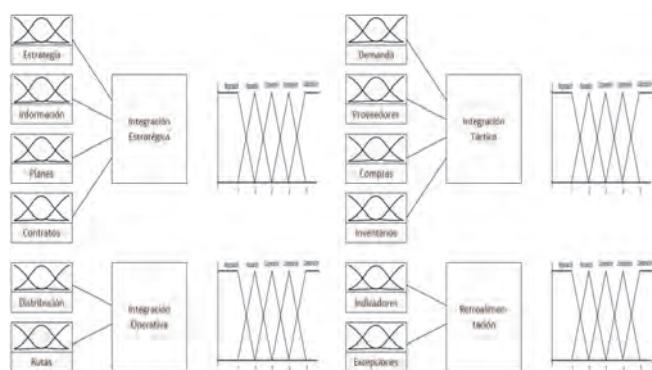


Figura 5. Etapa de fuzzificación de los factores de entrada.  
Fuente: Los Autores.

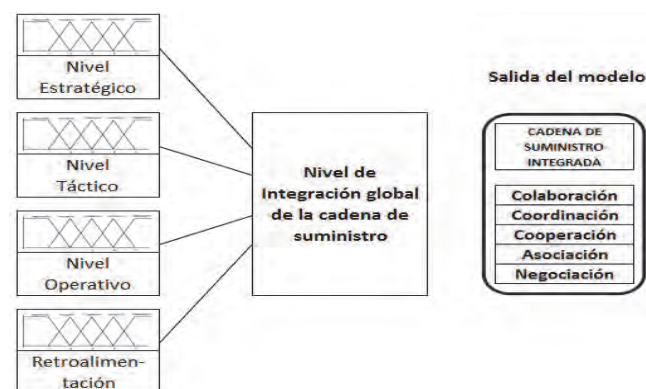


Figura 6. Etapa de defuzzificación a la salida del modelo de ICS.  
Fuente: Los Autores.

conclusión, son escritas como pares antecedentes-consecuentes de oraciones SI-ENTONCES y guardadas en forma tabular. La combinación de las etiquetas lingüísticas de las variables difusas forma la base de reglas difusas. En este trabajo se definieron 275 reglas de inferencia a través de expertos académicos para determinar la relación entre las distintas variables de entrada; se contemplaron todas las posibles combinaciones en las entradas y se asignó una conclusión a cada una.

El mecanismo de inferencia utiliza el criterio máximo-mínimo para calcular el valor difuso de salida; en primera instancia se considera a los valores de entrada y a la base de reglas difusas para determinar el conjunto de reglas que se activan y las conclusiones relacionadas (conjuntos difusos de la variable de salida). Para conocer el valor difuso de la regla activada se utilizan las operaciones entre conjuntos difusos, la ec. (2) se emplea para determinar el valor difuso de una regla activada (entrada del mecanismo de inferencia) y la ec. (3) nos muestra la unión para determinar el valor difuso de un conjunto de reglas activadas (salida del mecanismo de inferencia).

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (2)$$

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (3)$$

El proceso de defuzzificación sirve para convertir la salida del mecanismo de inferencia a información que pueda

ser interpretada por cualquier persona. Se utilizó el método del centro geométrico (centroide), con el siguiente procedimiento:

- La salida difusa se descompone en figuras regulares, de acuerdo a los grados de pertenencia de dos conjuntos difusos adyacentes (se busca generar triángulos y rectángulos para facilitar el cálculo de dichas áreas).
- Se calcula la superficie de cada figura obtenida en el inciso a).
- Se determina el centroide de cada figura.
- Se calcula el centroide total (CT) de acuerdo a la fórmula mostrada en la ec. (4).

$$CT = \frac{\sum_{i=1}^I \{[Superficie(A_i)][Centroide(A_i)]\}}{\sum_{i=1}^I [Superficie(A_i)]} \quad (4)$$

- Se determina la expresión lingüística para la variable de salida de acuerdo al valor del centroide encontrado.

Para ejemplificar los cálculos desarrollados, a continuación se muestra el cálculo del nivel de integración operativo.

Tomando los resultados de la aplicación del cuestionario en una de las empresas encuestadas para los factores distribución y rutas, y como consecuencia de la aplicación de la ec. (1) se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 1. Los valores de entrada están en una escala ordinal del 1 al 5, mientras que los valores difusos se encuentran en una escala de 0 a 1.

De donde: NE=etapa de negociación, AS=etapa de asociación, CP=etapa de cooperación, CR=etapa de coordinación, y CL=etapa de colaboración.

Se determinaron, con el apoyo de expertos, las reglas de inferencia entre las variables distribución y rutas del nivel de integración operativo. En la Tabla 2 se muestran las 25 reglas de inferencia definidas para las diferentes combinaciones de las variables de entrada; por ejemplo, si la variable distribución estuviera en NE y la variable rutas en CP, entonces la salida difusa será AS (regla 3). Si la variable distribución estuviera en CP y la variable rutas en CR, entonces la salida sería CR (regla 14).

Tabla 1.  
Valores obtenidos de la fuzzificación de las variables distribución y rutas.

| Distribución     |    |       | Rutas            |    |       |
|------------------|----|-------|------------------|----|-------|
| Valor de entrada |    | 4.500 | Valor de entrada |    | 4.000 |
| Valor difuso     | NE | 0.000 | Valor difuso     | NE | 0.000 |
|                  | AS | 0.000 |                  | AS | 0.000 |
|                  | CP | 0.000 |                  | CP | 0.000 |
|                  | CR | 0.500 |                  | CR | 1.000 |
|                  | CL | 0.500 |                  | CL | 0.000 |

Fuente: los Autores.

Tabla 2.  
Reglas de inferencia para el nivel de integración operativo.

|                        |    | Variable: Rutas |    |    |    |    |
|------------------------|----|-----------------|----|----|----|----|
|                        |    | NE              | AS | CP | CR | CL |
| Variable: Distribución | NE | NE              | NE | NE | AS | CP |
|                        | AS | NE              | AS | AS | CP | CP |
|                        | CP | NE              | AS | CP | CR | CR |
|                        | CR | AS              | CP | CR | CR | CL |
|                        | CL | CP              | CP | CR | CL | CL |

Fuente: los Autores.

Tabla 3.  
Etapas de integración difusas resultantes.

| Nivel de integración | Valor difuso |
|----------------------|--------------|
| Negociación          | 0.0          |
| Asociación           | 0.0          |
| Cooperación          | 0.0          |
| Coordinación         | 0.5          |
| Colaboración         | 0.5          |

Fuente: los Autores.

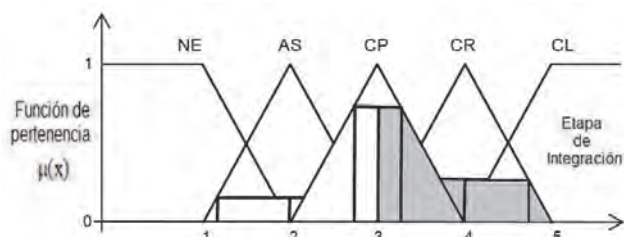


Figura 7. Áreas resultantes para el cálculo del centroide.  
Fuente: los Autores.

Al aplicar el mecanismo de inferencia dado por la ec. (2), de las 25 reglas de inferencia diseñadas para relacionar las dos variables tratadas, se activaron las reglas 19 (etapa CR) y 24 (etapa CL). Para encontrar la salida difusa del nivel de integración operativo se aplica la ec. (3) a los resultados anteriores, obteniéndose los valores mostrados en la Tabla 3; se puede apreciar que las etapas de integración CR y CL tiene un valor difuso de 0.5 y los demás valores se quedaron en 0.

Para encontrar el valor de defuzzificación y determinar el nivel de integración, se aplica la ec. (4), obteniéndose un valor de 4.3429, correspondiente al centroide de la parte sombreada de la Fig. 7. La etapa de integración correspondiente al valor difuso obtenido, dado como variable lingüística es COORDINACIÓN (CR). En la Fig. 7, las áreas sombreadas corresponden a las utilizadas para el cálculo del centroide.

### 3.4. Aplicación del modelo en distintas empresas

La aplicación del modelo se llevó a cabo entre los meses de mayo y agosto del año 2014. Se seleccionó una muestra de 36 empresas para validarlo [30], entre pequeñas, medianas y grandes empresas [44]. Las empresas se contactaron a través de las Cámaras locales de Comercio, los Departamentos de Vinculación de distintas escuelas de nivel superior y profesionales que brindan servicios en el área de logística a las mismas. Las empresas se encuentran ubicadas en los Estados de Veracruz, Tamaulipas, San Luis Potosí e Hidalgo, todos ellos en México.

## 4. Resultados y discusión

### 4.1. Validación del instrumento de medición

Para la realización de los análisis de confiabilidad y validez se utilizó el software IBM SPSS Statistics, versión 20. El resultado del análisis de confiabilidad (coeficiente alfa) se muestra en la Tabla 4, valores mayores de 0.75 se

Tabla 4.  
Coeficiente alfa calculado.

| Aplicado a:              | Elementos | Reactivos          | Alfa  |
|--------------------------|-----------|--------------------|-------|
| Todo el instrumento.     | 18        | Todos              | 0.970 |
| Integración estratégica. | 5         | 1, 2, 3, 4, 5      | 0.880 |
| Integración táctica.     | 6         | 6, 7, 8, 9, 10, 11 | 0.901 |
| Integración operativa.   | 3         | 12, 13, 14         | 0.846 |
| Retroalimentación.       | 4         | 15, 16, 17, 18     | 0.917 |

Fuente: los Autores.

Tabla 5.  
Resultados de las pruebas KMO y Bartlett.

| Prueba                             | Resultado                   |
|------------------------------------|-----------------------------|
| Medida de adecuación KMO.          | 0.855                       |
| Prueba de esfericidad de Bartlett. | Chi-cuadrado aprox. 621.327 |
|                                    | Gl 153                      |
|                                    | Sig. 0.000                  |

Fuente: los Autores.

consideran aceptables y arriba de 0.9 son de una confiabilidad elevada [31]. Con base en los resultados obtenidos se puede aseverar que el instrumento es confiable de forma global y en cada una de las dimensiones que lo integran.

Para realizar el análisis de la validez del instrumento (análisis factorial), en primer lugar se realizó el cálculo de dos estadísticos que permiten valorar la bondad de ajuste o adecuación de los datos analizados a un modelo factorial: la medida de adecuación muestral de Kaiser–Meyer–Olkin (KMO) y la prueba de esfericidad de Bartlett. En la Tabla 5 se muestran los resultados de ambas pruebas, valores mayores de 0.6 en la prueba KMO y menores de 0.05 en la prueba de Bartlett justifican la realización de un análisis factorial [29]; una vez analizados los resultados se concluye que el análisis factorial se puede aplicar de forma adecuada.

En la aplicación del análisis factorial se puede utilizar el método de análisis de componentes principales, debido a que el objetivo es condensar la mayoría de la información original en un número de factores para propósitos de predicción. Los factores a extraer son aquellos que tengan autovalores mayores a uno [29]. Se analizaron las 18 variables del instrumento diseñado obteniéndose los resultados mostrados en la Tabla 6, en donde se observa que dos factores obtienen valores mayores de 1, por lo que es la cantidad de factores que se extrae.

En la Tabla 7 se muestra la solución factorial encontrada; contiene las correlaciones entre las variables originales y cada uno de los factores. Se puede apreciar que a excepción de la pregunta P03, todas las demás saturan al factor uno dentro de la matriz de correlaciones (valores mayores de 0.71). La pregunta P03 es la única que presenta un valor significativo (0.704) en la carga del factor 2.

Analizando los resultados de la Tabla 7, se decidió trabajar con una sola variable denominada nivel de integración global. Para determinar si se puede eliminar del cuestionario la pregunta P03, se excluye su información y se repite el proceso de extracción; el resultado (Tabla 8) muestra niveles de carga mayores de 0.71 para cada factor que se consideran excelentes [29], por lo que se determina utilizar todas las preguntas (excepto la pregunta P03 que fue eliminada) para alimentar el modelo de ICS propuesto.

Tabla 6.  
Varianza total explicada.

| Factor | Autovalores iniciales |        |         | Sumas de las saturaciones |        |         |
|--------|-----------------------|--------|---------|---------------------------|--------|---------|
|        | Total                 | % var. | % acum. | Total                     | % var. | % acum. |
| 1      | 12.046                | 66.924 | 66.924  | 12.046                    | 66.924 | 66.924  |
| 2      | 1.045                 | 5.808  | 72.732  | 1.045                     | 5.808  | 72.732  |
| 3      | 0.916                 | 5.092  | 77.824  |                           |        |         |
| 4      | 0.626                 | 3.476  | 81.299  |                           |        |         |
| 5      | 0.564                 | 3.134  | 84.434  |                           |        |         |
| 6      | 0.481                 | 2.674  | 87.108  |                           |        |         |
| 7      | 0.393                 | 2.183  | 89.291  |                           |        |         |
| 8      | 0.372                 | 2.066  | 91.357  |                           |        |         |
| 9      | 0.306                 | 1.702  | 93.059  |                           |        |         |
| 10     | 0.268                 | 1.488  | 94.548  |                           |        |         |
| 11     | 0.241                 | 1.338  | 95.885  |                           |        |         |
| 12     | 0.193                 | 1.074  | 96.960  |                           |        |         |
| 13     | 0.152                 | 0.844  | 97.804  |                           |        |         |
| 14     | 0.138                 | 0.765  | 98.569  |                           |        |         |
| 15     | 0.095                 | 0.527  | 99.096  |                           |        |         |
| 16     | 0.083                 | 0.461  | 99.557  |                           |        |         |
| 17     | 0.051                 | 0.285  | 99.842  |                           |        |         |
| 18     | 0.028                 | 0.158  | 100.000 |                           |        |         |

Fuente: los Autores.

Tabla 7.  
Solución factorial encontrada.

| Pregunta | Factor |        |
|----------|--------|--------|
|          | 1      | 2      |
| P15      | 0.904  | 0.060  |
| P18      | 0.874  | -0.002 |
| P17      | 0.867  | -0.062 |
| P16      | 0.866  | -0.272 |
| P07      | 0.865  | 0.038  |
| P05      | 0.860  | -0.026 |
| P01      | 0.833  | -0.253 |
| P02      | 0.831  | -0.095 |
| P04      | 0.831  | 0.074  |
| P09      | 0.827  | 0.265  |
| P06      | 0.827  | 0.282  |
| P11      | 0.818  | 0.061  |
| P10      | 0.811  | -0.391 |
| P08      | 0.808  | -0.221 |
| P14      | 0.780  | -0.094 |
| P12      | 0.745  | 0.155  |
| P13      | 0.740  | -0.006 |
| P03      | 0.583  | 0.704  |

Fuente: los Autores.

Analizando la carga factorial de cada pregunta en la Tabla 8 y reagrupándolas por carga factorial, se obtienen los nuevos valores para el coeficiente alfa de las distintas dimensiones del modelo de ICS. La pregunta P07 que se consideraba como parte de la medición del nivel de integración táctico se reagrupó

Tabla 8.  
Cargas factoriales recalculadas.

| Reactivo | Carga factorial | Reactivo | Carga factorial |
|----------|-----------------|----------|-----------------|
| P15      | 0.903           | P10      | 0.824           |
| P16      | 0.875           | P09      | 0.821           |
| P18      | 0.872           | P06      | 0.820           |
| P17      | 0.866           | P11      | 0.818           |
| P05      | 0.862           | P08      | 0.815           |
| P07      | 0.861           | P14      | 0.782           |
| P02      | 0.836           | P12      | 0.743           |
| P01      | 0.836           | P13      | 0.735           |
| P04      | 0.831           |          |                 |

Fuente: los Autores.

Tabla 9.  
Reestructuración del modelo de ICS.

| Aplicado a:              | No. De elementos | Reactivos         | Alfa  |
|--------------------------|------------------|-------------------|-------|
| Todo el instrumento.     | 17               | Todos excepto P03 | 0.971 |
| Integración estratégica. | 5                | 1, 2, 4, 5, 7     | 0.914 |
| Integración táctica.     | 5                | 6, 8, 9, 10, 11   | 0.905 |
| Integración operativa.   | 3                | 12, 13, 14        | 0.758 |
| Retroalimentación.       | 4                | 15, 16, 17, 18    | 0.931 |

Fuente: los Autores.

Tabla 10.  
Etapas de integración obtenidas por empresa.

| Etapas de integración | Cantidad de empresas por etapa |
|-----------------------|--------------------------------|
| NE                    | 11                             |
| AS                    | 8                              |
| CP                    | 8                              |
| CR                    | 7                              |
| CL                    | 2                              |

Fuente: los Autores.

en el nivel de integración estratégico por la carga factorial que representa.

En la Tabla 9 se muestra la nueva distribución de preguntas que alimentan al modelo y los correspondientes coeficientes alfa obtenidos.

Con los resultados obtenidos del análisis realizado, quedó determinada la validez y confiabilidad del instrumento de medición.

#### 4.2. Niveles de integración alcanzados por las empresas encuestadas

Una vez alimentado el modelo de ICS, con las respuestas del cuestionario aplicado a las distintas empresas, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 10; de las 36 empresas encuestadas se encontraron 11 en la etapa de negociación, 8 en asociación, 8 en cooperación, 7 en coordinación y 2 en colaboración. Se puede apreciar que la mayoría de las empresas valoradas se encuentran en las etapas centrales de integración (AS, CP y CR), mientras que la etapa de colaboración es la más difícil de alcanzar para las empresas.

Analizando los niveles estratégico, táctico, operativo y la retroalimentación (medición del desempeño por medio de indicadores y excepciones) por separado, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 11; se aprecia que a nivel estratégico la mayoría de las empresas encuestadas se encuentran en las etapas bajas del proceso de integración (25 empresas entre las etapas de NE, AS y CP), mientras que a nivel táctico, operativo y en medición del desempeño se encuentran en las etapas medias del proceso de integración (AS, CP y CR con una cantidad de 25, 24 y 23 empresas respectivamente).

Aunque el nivel de integración global máximo (colaboración) lo alcanzaron solamente 2 empresas, en la Tabla 11 se puede ver que en la etapa CL, a nivel estratégico se encuentran 3 empresas, 2 empresas a nivel táctico, una empresa a nivel operativo y 2 en la medición del desempeño y excepciones.

Tabla 11.

Niveles de integración estratégico, táctico y operativo desglosados.

| Etapas | Integración |         |           |            |
|--------|-------------|---------|-----------|------------|
|        | Estratégica | Táctica | Operativa | Retroalim. |
| NE     | 12          | 9       | 11        | 11         |
| AS     | 10          | 6       | 7         | 7          |
| CP     | 5           | 14      | 11        | 11         |
| CR     | 6           | 5       | 6         | 5          |
| CL     | 3           | 2       | 1         | 2          |

Fuente: los Autores.

## 5. Conclusiones

Para la formulación del modelo, se realizó una revisión bibliográfica sobre el estado del conocimiento de la ICS en artículos científicos, tesis doctorales y libros especializados, logrando establecer los elementos conceptuales que permitieron definir un modelo de integración de cadenas de suministro colaborativas desde los niveles estratégico, táctico y operativo; así mismo, se definieron las características que determinan las etapas de integración como salida del modelo y su interacción conjunta.

El instrumento de medición se validó estadísticamente con información proporcionada por 36 empresas entre pequeñas, medianas y grandes; los resultados indican que el modelo puede aplicarse a cualquier empresa que desee medir y mejorar el nivel de integración de su CS.

Para la resolución del modelo se empleó la lógica difusa, que es una técnica de la inteligencia artificial, que permite modelar expresiones lingüísticas como expresiones matemáticas y definir por expertos la relación entre las variables en un plano cuantitativo; además de que se adapta con facilidad a la incertidumbre asociada a las variables.

Como resultado de la aplicación del modelo se determinó que la mayoría de las empresas se encuentran por debajo de la media (etapa de cooperación) en su nivel de integración y que deben de implementar acciones, sobre todo a nivel estratégico (nivel donde se encuentra la etapa de integración más baja de las empresas encuestadas en su conjunto). Las acciones se deben de implementar con los integrantes estratégicos de la CS y enfocarse en mejorar la estrategia y el plan de negocios conjunto, acordar y optimizar el flujo de información, e integrar y mantener actualizados los planes y contratos de acuerdo a los indicadores y las excepciones operativas a los contratos, encontradas.

Como trabajos futuros se buscará aplicar el modelo de ICS en empresas de sectores productivos específicos, para verificar que el modelo desarrollado se pueda implementar en dichos sectores. Así mismo, se desarrollará una aplicación computacional, con un sistema experto embebido, que permita a las empresas monitorear en tiempo real su nivel de integración y les muestre los indicadores que requieren su atención para mejorar el nivel de integración actual.

## Referencias

- [1] Andersen, A., Implementing integrated supply chain management for competitive advantage [Online], Institute of Management Accountants, USA, 1999 [date of reference January 20th of 2014]. Available at:

- <http://www.imanet.org/PDFs/Public/Research/SMA/Implementing%20Integrated%20Supply%20Chain.pdf>.
- [2] Stevens, G.C., Integrating the supply chain. *International Journal of Physical Distribution & Materials Management*, 19 (8), pp. 3-8, 1989.
- [3] Crespo-Marquez, A., Dynamic modelling for supply chain management. Ed. Springer London, 2010, pp 171-188.
- [4] Waters, D., Logistics: An introduction to supply chain management. Ed. Plagrave Macmillan, England, 2003, pp 27-54.
- [5] Albrecht, M., Supply chain coordination mechanisms, *New Approaches for Collaborative Planning*, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Ed. Springer Germany, 2010, pp. 5-62.
- [6] Pires, S. y Carretero, L., Gestión de la cadena de suministros, Ed. Mc Graw Hill España, 2007.
- [7] Sablón-Cossio, N., Modelo de planificación colaborativa estratégico en cadenas de suministros en Cuba. Tesis Doctorado en Ciencias Técnicas, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Matanzas: Matanzas, Cuba. 2014.
- [8] Hernández, J., Mula, J., Poler, R. and Lyons, A., Collaborative planning in multi-tier supply chains supported by a negotiation-based mechanism and multi-agent system, *Group Decision and Negotiation*, 23 (2), pp 235-269, 2014.
- [9] Lopez, F. and Coelho, H., Bilateral negotiation in a multi-agent supply chain system. *E-Commerce and Web Technologies (EC-Web)*, 2010, pp. 195-206.
- [10] Saberi, S., and Makatsoris, C., Multi agent system for negotiation in supply chain management. *The 6th International Conference on Manufacturing Research (ICMR08)*, 2008, pp. 311-317.
- [11] Putten, S.V., Robu, V., Poutré, H.L., Jorritsma, A. and Gal, M., Automating supply chain negotiations using autonomous agents: A case study in transportation logistics. *AAMAS*, 2006, pp. 8-12.
- [12] Chao, Y., Lin, H.W. and Murata, T., Negotiation based collaborative planning in two-tier supply chain. *Proceedings of International Multiconference of Engineers and Computer Scientists*, 3, 2010.
- [13] Kolka, A., van-Tulderb, R. and Kostwinder, E., Business and partnerships for development. *European Management Journal*, 26 (4), pp. 262-273, 2008.
- [14] Ming, Y., Grabot, B. and Raymond, H., A typology of the situations of cooperation in supply chains. *Computers & Industrial Engineering*, 67, pp 56-71, 2014.
- [15] Yong, Y., Chen-Guang, L. and Ikou K., Cooperation and leadership policies in a serial supply chain. *Journal of Manufacturing Systems*, 30 (1), pp. 1-7, 2011.
- [16] Hülsman, M., Grappa, J. and Li, Y., Strategic adaptivity in global supply chains - Competitive advantage by autonomous cooperation. *International Journal of Production Economics*, 114 (1), pp. 14-26, 2008.
- [17] Moussawi-Haidara, L., Dbouka, W., Jaber, M. and Ibrahim H.O., Coordinating a three-level supply chain with delay in payments and a discounted interest rate. *Computers & Industrial Engineering*, 69, pp. 29-42, 2014.
- [18] Arshinder, Kanda, A. and Deshmukh, S. Supply chain coordination: Perspectives, empirical studies and research directions. *International Journal of Production Economics*, 115 (2), pp 316-335, 2008.
- [19] Ximin, H., Jia-Wen, G., Wai-Ki, Ch. and Tak-Kuen, S., Impact of secondary market on consumer return policies and supply chain coordination. *Omega*, 45, pp. 57-70, 2014.
- [20] Ma, P., Wang, H. and Shang, J., Contract design for two-stage supply chain coordination: Integrating manufacturer-quality and retailer-marketing efforts. *International Journal of Production Economics*, 146 (2), pp. 745-755, 2013.
- [21] Arya, A., Löffler, C., Mittendorf, B. and Pfeiffer, T., The middleman as a panacea for supply chain coordination problems. *European Journal of Operational Research*, 240 (2), pp. 393-400, 2015.
- [22] Ashayeri, J. and Kampstra, P., Collaborative replenishment: A step-by-step approach. *Dynamic Green Logistics*, 14, 2003.
- [23] Hao, H., Xinggen, W. and Hongyu, L., Research on the Collaborative Plan of Implementing High Efficient Supply Chain. *Energy Procedia*, 16, pp. 1118-1123, 2012.
- [24] Mei-Cao, Vonderembse, M., Zhang, O. and Ragu-Nathan, T., Supply chain collaboration: Conceptualisation and instrument development. *International Journal of Production Research*, 48 (22), pp. 6613-6635, 2010.

- [25] VICS (Voluntary Interindustry Commerce Standards), Business planning, linking CPFR and SOP: A roadmap to integrated business planning, 2010, 24 P.
  - [26] Alemany-Díaz, M., Alarcón-Valero, F., Lario-Esteban, F. et al., Herramienta informática para el diseño y ejecución del proceso de planificación colaborativa en cadenas de suministro (1ª parte). DYNA, 85 (1), pp. 61-70, 2010.
  - [27] Arango-Serna, M.D., Adarme-Jaimes, W. and Zapata-Cortes, J.A., Collaborative inventory in supply chain optimization. DYNA, 80 (181), pp. 71-80, 2013.
  - [28] Ta-Ping, L., Trappey, A., Yi-Kuang, C. and Yu-Da, C., Collaborative design and analysis of supply chain network management key processes model. Journal of Network and Computer Applications, 36 (6), pp. 1503-1511, 2013.
  - [29] Cano-Olivos, P., Orue-Carrasco, F., Martínez-Flores, J.L., Mayett-Moreno, Y. and López-Nava, G., Modelo de gestión logística para pequeñas y medianas empresas en México. Contaduría y Administración, 60 (1), pp. 181-203, 2015.
  - [30] Malhotra, N., Investigación de mercados, Ed. Prentice Hall México, 2008.
  - [31] Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C. and Baptista-Lucio, M., Metodología de la investigación, Ed. Mc Graw Hill, México, 2010.
  - [32] Hokey, M. and Gengui, Z., Supply chain modelling: Past, present and future. Computers & Industrial Engineering, 43, pp. 231-249, 2002.
  - [33] Campuzano-Bolarín, F., Martínez-Caro, E. and Ros-McDonell, L., Cadenas de suministro tradicionales y colaborativas. Análisis de su influencia en la gestión de la variabilidad de la demanda. DYNA Ingeniería e Industria, 85 (1), pp. 33-40, 2010.
  - [34] S.M.J.-Mirzapour, A., Malekly H. and Aryanezhad, M.B., A multi-objective robust optimization model for multi-product multi-site aggregate production planning in a supply chain under uncertainty. International Journal of Production Economics, 134 (1), 28-42, 2011.
  - [35] You, F., Wassick, J.M. and Grossmann, I.E., Risk management for a global supply chain planning under uncertainty: Models and algorithms. American Institute of Chemical Engineers Journal, 55, pp. 931-946, 2009.
  - [36] Peidro, D., Mula, J., Polera, R. and Verdegayb, J.L., Fuzzy optimization for supply chain planning under supply, demand and process uncertainties. Fuzzy Sets and Systems, 160 (18), pp. 2640-2657, 2009.
  - [37] Wang, J.L., A supply chain application of fuzzy set theory to inventory control models – DRP system analysis. Expert Systems with Applications. An International Journal, 36 (5), pp. 9229-9239, 2009.
  - [38] Yuh-Wen, C., Larbani, M. and Chen-Hao, L. Simulation of supply chain game with multiple fuzzy goals. Fuzzy Sets and Systems, 161 (11), pp. 1489-1510, 2010.
  - [39] Ghane, M. and Jafar, M., Multi-objective design of fuzzy logic controller in supply chain. Journal of Industrial Engineering International, 8 (10), 2012.
  - [40] Peidro, D., Mula, J., Jimenez, M. and Botella, M.M., A fuzzy linear programming based approach for tactical supply chain planning in an uncertainty environment. European Journal of Operational Research, 295 (1), pp. 65-80, 2010.
  - [41] Aguilar-Lasserre, A., Lafarja-Solabac, M., Hernandez-Torres, R., Posada-Gómez, R., Juárez-Martínez, U. and Fernández-Lambert, G., Expert system for competences evaluation 360° feedback using fuzzy logic. Mathematical Problems in Engineering, pp. 1-18, 2014.
  - [42] Adarme-Jaimes, W., Arango-Serna, M.D. and Cogollo-Flórez, J.M., Medición del desempeño para cadenas de abastecimiento en ambientes de imprecisión usando lógica difusa. Ingeniería y Universidad. [Online]. 16 (1), 2012. [Fecha de consulta: 8 de noviembre de 2013] Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=47723297006>.
  - [43] Escobar-Gómez, E., Díaz-Núñez, J. and Taracena-Sanz, L., Modelo para el ajuste de pronósticos agregados utilizando lógica difusa. Ingeniería, Investigación y Tecnología, 11 (3), pp. 289-302, 2010.
  - [44] Micro, pequeña, mediana y gran empresa, estratificación de los establecimientos: Censos Económicos 2009 / Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), México, 2011.
- H. Bautista-Santos**, es Dr. en Logística y Dirección de la Cadena de Suministro. Es Profesor-Investigador en el Instituto Tecnológico Superior de Tantoyuca, Veracruz, México, en el que labora desde el año 1995. ORCID: 0000-0002-3925-2438
- J.L. Martínez-Flores**, es Dr. en Ingeniería con especialidad en Ingeniería de Sistemas. Perteneció al Sistema Nacional de Investigadores nivel 1, recibió el Premio Nacional de Logística en el área Académica en el año 2013. Es Profesor-Investigador del Posgrado en logística y dirección de la cadena de suministro en la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, México. ORCID: 0000-0003-2986-469X
- G. Fernández-Lambert**, es Dr. en Logística y Dirección de la Cadena de Suministro. Obtuvo una mención honorífica de mérito a la investigación en su trabajo de investigación doctoral. Es Profesor-Investigador en el Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Veracruz, México en el que labora desde el año 1994. ORCID: 0000-0002-4259-296X
- M.B. Bernabé-Loranca**, es Dra. en Investigación de Operaciones por la Universidad Nacional Autónoma de México, México. Perteneció al Sistema Nacional de Investigadores nivel 1. Realizó estudios de posdoctorado en la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, México. Es Profesora-Investigadora de la Facultad de Ciencias de la Computación en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México, desde el año 1995. ORCID: 0000-0003-3014-4139
- F. Sánchez-Galván**, es estudiante del Doctorado en Logística y Dirección de la Cadena de Suministro en la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla. Es Profesora-Investigadora en el Instituto Tecnológico Superior de Tantoyuca, Veracruz, México en el que labora desde el año 1998. ORCID: 0000-0002-6534-3210
- N. Sablón-Cossío**, es Dra. en Ciencias Técnicas. Es Profesora-Investigadora en la Universidad Estatal Amazónica, Ecuador en el Departamento de Ciencias de la Tierra. ORCID: 0000-0002-6691-0037

# Effects of uncertainty on scheduling of highway construction projects

Hernán Darío Gómez<sup>a</sup> & Armando Orobio<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Universidad del Valle, Cali, Colombia. [hernan.gomez@correounivalle.edu.co](mailto:hernan.gomez@correounivalle.edu.co)

<sup>b</sup> Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Universidad del Valle, Cali, Colombia. [armando.oro bio@correounivalle.edu.co](mailto:armando.oro bio@correounivalle.edu.co)

Received: November 22<sup>th</sup>, 2014. Received in revised form: July 27<sup>th</sup>, 2015. Accepted: September 07<sup>th</sup>, 2015

## Abstract

Time and cost overruns in highway construction are usual in Colombia. Contractors regularly fail in cost estimation and construction scheduling. An analysis of important factors on time and cost overruns in highway construction in southwest Colombia is presented in this paper. Forty highway construction projects were reviewed. Data from construction documents were collected to prepare a data base for probabilistic analysis. Data collected include scheduled construction time and cost, actual construction time and cost, and unexpected events which could have affected the construction process. Data were used in a probabilistic cost and schedule risk analysis to identify critical factors in construction time and cost overruns in the region. It was found that the activities that most affect the time and cost overruns are the construction of the granular base and the asphalt layer. The most common causes of construction overruns were found to be poor cost and duration estimates, rain, and materials supply problems.

**Keywords:** Highway Infrastructure; construction scheduling; time overrun; cost overrun

# Efectos de la incertidumbre en la programación de proyectos de construcción de carreteras

## Resumen

Las demoras y sobrecostos en la construcción de carreteras son cotidianos en Colombia. Se presentan imprecisiones en la estimación de los costos y en la programación de la construcción. Este artículo presenta un análisis de los factores determinantes en las demoras y sobrecostos en la construcción de carreteras en el sur occidente colombiano. Se revisaron 40 proyectos viales construidos en la región, la información revisada incluyó la programación de tiempo y costo, los datos de duraciones y costos reales de cada actividad, y las bitácoras de obra. Se realizó una simulación para evaluar probabilísticamente las prácticas de programación e identificar factores determinantes en las demoras y sobrecostos de las obras. Se encontró que las actividades que más inciden en las demoras y sobrecostos son la base granular y la carpeta asfáltica, las causas más comunes son las malas estimaciones de costos y duración, la lluvia y los problemas de suministro de materiales.

**Palabras clave:** Infraestructura vial; programación de obra; demoras; sobrecostos

## 1. Introducción

Realizar una buena gestión es importante para el éxito en la ejecución de cualquier proyecto. La identificación, análisis y planificación de riesgos permite la toma acciones de mitigación para reducir los impactos sobre los objetivos principales del proyecto; alcance, costo, tiempo y calidad.

Una buena programación posibilita la realización del

control necesario para ejecutar el proyecto dentro de un margen razonable de tiempo y costo. La mala estimación de la duración y costo de las actividades son riesgos en programación que pueden conllevar al fracaso de un proyecto.

Esta investigación se enfoca en el análisis de los efectos de la incertidumbre en tiempo y costo en la programación de proyectos de construcción de carreteras. El principal objetivo

es determinar qué tan sensible es este tipo de proyectos a la incertidumbre en la estimación del tiempo y costo de las actividades que lo componen. Se realiza una jerarquización de los efectos en el proyecto de las variaciones de las estimaciones de tiempo y costo de sus actividades. Para lo cual se efectúa un análisis cuantitativo del riesgo, aplicando simulación Monte Carlo sobre modelos de programación basados en el método de la ruta crítica (CPM). El comportamiento de las actividades se establece mediante distribuciones probabilísticas construidas a partir de datos históricos de proyectos similares, lo que permite cuantificar los efectos de la incertidumbre en las estimaciones y establecer la sensibilidad del costo y duración del proyecto a estimaciones realizadas durante la programación.

Adicional al análisis anterior, con base en la información recolectada de proyectos similares, se identifican algunas causas endógenas y exógenas que afectan las actividades que componen este tipo de proyectos.

## 2. Marco teórico

Las simulaciones permiten cuantificar los efectos de los riesgos en la programación de proyectos de construcción, posibilitando la evaluación de los efectos sobre la duración y costos de los proyectos de las estimaciones realizadas durante la etapa de programación. Estudios previos proponen utilizar la gestión de riesgos para una programación proactiva de proyectos de construcción [1,2]. Otros autores proponen un enfoque probabilístico para controlar el costo y tiempo en la ejecución de proyectos [3].

El método de Simulación Monte Carlo (SMC) se puede utilizar para realizar análisis de sensibilidad de las estimaciones realizadas durante la programación de los proyectos [4]. La SMC consiste en el desarrollo de un modelo lógico o matemático, cuyos datos de entrada son muestreados de manera aleatoria mediante funciones probabilísticas establecidas con un muestreo de datos reales, con el objetivo de vislumbrar el panorama de los diferentes resultados posibles del modelo. La SMC involucra los conceptos estadísticos del muestreo aleatorio con lo que se pueden realizar repetidas estimaciones con base a un modelo de programación CPM para analizar el espectro de posibilidades de la ejecución de un proyecto. Algunos investigadores han usado previamente SMC para evaluar riesgos en proyectos de construcción [5].

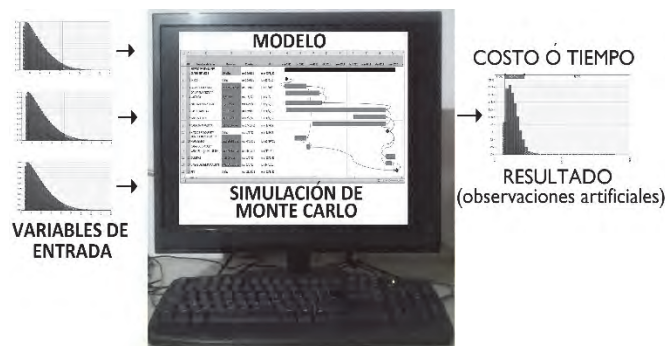


Figura 1. Esquema de simulación Monte Carlo.  
Fuente: Los autores

Tabla 1.

Funciones estadística para definir actividades como variables.

|                |                   |                   |
|----------------|-------------------|-------------------|
| Beta           | BetaGeneral       | Beta-Subjetiva    |
| Binomial       | Chi cuadrado      | Cumulative        |
| Discreta       | Discreta Uniforme | Error Función     |
| Erlang         | Exponential       | Extreme Value     |
| Gamma          | General           | Geométrica        |
| Histograma     | Hypergeométrica   | Inversa Gaussiana |
| EnteraUniforme | Logistic          | Log-Logistic      |
| Lognormal      | Lognormal2        | Negativa Binomial |
| Normal         | Pareto            | Pareto2           |
| Pearson V      | Pearson VI        | PERT              |
| Poisson        | Rayleigh          | Student's t       |
| Triangular     | Trigen            | Uniforme          |
| Weibull        | Compuesta         |                   |

Fuente: [11]

La SMC se utiliza para aproximar una solución numérica a un problema estadístico cuando la solución analítica es demasiado compleja. Este método propone una variación ordenada de las entradas al modelo, con lo que se obtiene un número de observaciones artificiales (Fig. 1), utilizando la analogía entre la cantidad y la probabilidad de un evento, con relación al universo de posibilidades, como lo establece la ley de los grandes números que plantea que esta estimación converge al verdadero valor del volumen de conjuntos a medida que el número de resultados aumenta [6,7].

En el caso de la programación de proyectos, bajo los conceptos mencionados, el método de SMC plantea establecer las actividades que componen el proyecto como variables que siguen un patrón estadístico establecido, en función de datos extraídos de proyectos reales, los cuales son ajustados a distribuciones probabilísticas como las que se indican en Tabla 1 [8].

El método establece que los datos extraídos de los proyectos se usan para estimar los parámetros de las distribuciones probabilísticas que apliquen de acuerdo con las restricciones y condiciones asociadas a cada función, utilizando como herramienta de ajuste el método de los mínimos cuadrados. El mejor ajuste de los datos a una distribución probabilística es determinado con base en los siguientes criterios [9]:

- Criterio de Información Akaike (AIC)
- Criterio de Información Bayesiano (BIC)
- Chi-Cuadrada
- Kolmogorov-Smirnov (KS)
- Anderson-Darling (AD)

Se elige uno de los anteriores criterios para establecer la distribución probabilística que refleje mejor el comportamiento de los datos. Para cada variable los datos se ajustan a una distribución probabilística que es usada para seleccionar aleatoriamente datos de entrada al modelo durante la simulación [10]. Uno de los criterios más utilizados es el Akaike (AIC), el cual se establece como una medida de calidad para un conjunto de datos basada en la entropía de la información, donde el criterio de selección establece escoger la distribución con los valores más bajos de AIC [11].

Para el desarrollo de este tipo de simulaciones en proyectos de construcción, es necesario establecer los modelos de programación de costo y tiempo que permitan

desarrollar predicciones con sus correspondientes variables de entrada y de salida. Un aspecto clave de ésta metodología es que el costo total de un proyecto es igual a la suma de los costos directos e indirectos, y que los costos indirectos dependen ampliamente de la duración del proyecto.

Los costos directos son los costos asociados a la ejecución directa de cada actividad del proyecto, es decir que los costos directos totales son la sumatoria de los costos de ejecución de todas actividades del proyecto. Los costos indirectos son costos asociados a la administración del proyecto, estos costos no pueden ser asignados directamente a una actividad específica del proyecto, dado que se generan de manera transversal a lo largo de su ejecución, por lo general estos costos corresponden a salarios, impuestos, seguros, servicios, etc.

Otro concepto a tener en cuenta para realizar una simulación de este tipo de proyectos, es que el tiempo total del proyecto se estima con un modelo de programación, que se elabora en función de las interrelaciones de las actividades a ejecutar, las cuales definen la lógica de ejecución. En la industria de la construcción el modelo de programación es generalmente elaborado por el método CPM.

El CPM desarrollado en el año 1957 en los Estados Unidos, permite la programación del proyecto, determinado la duración del mismo a partir de la duración de sus actividades y la interrelación existente entre ellas, siguiendo una secuencia lógica de acuerdo al proceso constructivo. En este método se establecen restricciones tales que la imposibilidad de iniciar una actividad antes de que sus predecesoras terminen o tengan un avance suficiente para garantizar que la actividad no presente obstrucciones durante su ejecución. Con esto se establece un orden cronológico de ejecución con hitos claves, donde la duración del proyecto es determinada por las actividades que componen la ruta crítica, que no tienen holguras que permitan retrasos sin afectar la fecha de terminación del proyecto.

Es importante indicar que los eventos que pueden afectar una obra pueden ser riesgos que impacten de manera negativa el desarrollo de las actividades en costo y duración, así como también pueden ser oportunidades que beneficien el desarrollo de la obra generando ahorros en tiempo y costo. Partiendo de lo anterior, es importante siempre identificarlos los riesgos con el fin de plantear estrategias para mitigar la ocurrencia de las amenazas y fomentar la ocurrencia de las oportunidades.

### 3. Metodología de la investigación

Para evaluar los efectos de la incertidumbre en tiempo y costo en la programación de proyectos de construcción de infraestructura vial, se realizó un análisis con base en un caso de estudio, que se modeló bajo el método de simulación Monte Carlo. A partir de la sensibilidad del modelo de programación CPM con respecto a sus datos de entrada, se establecieron los efectos de la incertidumbre de las estimaciones hechas para cada actividad en el costo y la duración final del proyecto. Permitiendo identificar actividades cuyas desviaciones en ejecución, respecto a lo programado, tienen mayor incidencia en el resultado final del proyecto. El análisis de la información adicional recolectada de la ejecución de los proyectos permitió establecer cuáles

fueron las causas de la ocurrencia de las desviaciones con respecto al programa de ejecución.

Para realizar la simulación se utilizó un software especializado en análisis de riesgos [11], que permite realizar las simulaciones Monte Carlo sobre modelos de programación CPM. Cada simulación comprendió 10.000 iteraciones y se desarrollaron tres modelaciones con las siguientes configuraciones:

- i. En el modelo de programación CPM construido para el caso de estudio, se definieron las duraciones de las actividades como variables inciertas que siguen distribuciones probabilísticas definidas a partir de datos históricos provenientes del análisis de 40 proyectos ejecutados en la región. La duración total del proyecto se estableció como la variable de salida de donde se interpretaron los efectos causados por los diferentes valores que toman las duraciones durante cada iteración en la simulación.
- ii. El modelo de costos se desarrolló en una hoja electrónica que contiene las mismas actividades del modelo CPM, considerando los costos unitarios como variables inciertas con distribuciones de probabilidad definidas a partir de datos de los 40 proyectos estudiados. El costo directo total del proyecto se estableció como la variable de salida para analizar los resultados generados por las iteraciones de la simulación.
- iii. Similar a la simulación anterior pero adicionando los costos administrativos al modelo de costo directos. Los costos administrativos se agregaron como una variable dependiente de la duración del proyecto. Los costos totales, conformados por la suma de los costos directos más los costos administrativos, se definieron como la variable de salida para interpretar los resultados de las iteraciones de la simulación.

Con estas simulaciones fue posible identificar varios elementos que inciden de manera importante en el incremento del costo y tiempo del proyecto. Adicionalmente con base en los datos recolectados, se establecieron algunas de las causas que afectan las actividades en costo y duración, registrando la frecuencia de ocurrencia de los eventos y el promedio de magnitud de estos cuando se presenta.

### 4. Recolección de información

Se revisaron 40 proyectos de construcción de infraestructura vial, se recolectaron documentos tales como las bitácoras de obra, actas de liquidación y memorias de cantidades de las actas de pagos parciales, y la información de programación y control de obra. El análisis de la información se centró en los costos de las actividades y su duración en el desarrollo de las obras.

Debido al método que actualmente se utiliza para la elaboración de los presupuestos, en donde una actividad puede estar disgregada en varios ítem que componen el presupuesto con unidades de medida diferente, fue necesario realizar la reagrupación de los costos unitarios en función de las actividades que se establecieron en el modelo CPM. En la Tabla 2 se muestran las consideraciones contempladas para consolidar los datos de los presupuestos de los proyectos utilizados para conformar la base de datos.

Tabla 2.

Consideraciones para ajuste de los presupuestos

| Actividad                                 | Und | Descripción del Costo asociado                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-------------------------------------------|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cajeo                                     | m3  | Excavación sin clasificar a máquina, incluye retiro y movilización de maquinaria                                                                                                                                                                                                                      |
| Conformación de la sub-rasante            | m2  | Conformación de la calzada existente                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Sub-base granular                         | m3  | Suministro e instalación de Sub-base granular, incluye acarreo de la planta a la obra y movilización de maquinaria.                                                                                                                                                                                   |
| Base granular                             | m3  | Suministro e instalación de Base granular, incluye acarreo de la planta a la obra e incluye movilización de maquinaria.                                                                                                                                                                               |
| Imprimación                               | m2  | Riego de imprimación con emulsión asfáltica.                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Carpeta asfáltica                         | m3  | Suministro e instalación de mezcla densa en caliente tipo MDC, incluye acarreo de la planta a la obra y movilización de maquinaria.                                                                                                                                                                   |
| Cunetas en concreto                       | m   | Suministro e instalación de Concreto clase D: 3000 psi para canaletas, incluye excavación y formaleta.                                                                                                                                                                                                |
| Encoles y descoles                        | m3  | Suministro e instalación de Concreto clase D: 3000 psi para encoles y descoles de tuberías de desagüe, incluye 65 kg de acero por m3 de concreto, excavación y formaleta.                                                                                                                             |
| Tubería de concreto reforzado de 900 mm   | m   | Suministro e instalación Tubería de concreto reforzado de 900 mm de diámetro interior, incluye transporte, colocación de 0,48 m3 de lecho de arena por metro lineal de tubería, 1,8 m3 de excavación a máquina por metro lineal de tubería y 0,6 m3 de relleno importado por metro lineal de tubería. |
| Líneas de demarcación con pintura en frío | m   | Líneas de demarcación con pintura en frío                                                                                                                                                                                                                                                             |

Fuente: Los autores

Los datos de costos de años anteriores fueron actualizados utilizando los índices de Costos de la Construcción Pesada (ICCP) obtenidos de información estadística del DANE.

## 5. Selección del proyecto

El caso de estudio seleccionado fue la rehabilitación de un tramo de la vía Jamundí – Timba, en el Departamento del Valle del Cauca, Colombia. La obra se ejecutó entre de septiembre de 2011 y mayo de 2012, con un costo total de \$7.569'301.751, distribuido de la siguiente manera:

- Costo directo: \$5.756'123.005.
- Costos administrativos: \$1.813'178.746 (Incluidos utilidades, imprevistos e impuestos).
- Duración programada 5 meses (150 días).
- Duración real 6.5 meses (194 días).

En el análisis solo se consideraron las actividades comunes en el caso de estudio y los proyectos revisados para efectos de la construcción de las distribuciones de probabilidad. Las demás actividades se consideraron como parámetros fijos debido a que no se encontró información suficiente para construir sus distribuciones de probabilidad. Las actividades incluidas en el análisis se muestran en la

Tabla 3.

Presupuest

o de actividades del caso de estudio (costos directos).

| Descripción                               | Und | Cant.  | V.Und        | V. total             |
|-------------------------------------------|-----|--------|--------------|----------------------|
| Cajeo                                     | m3  | 5.459  | 18.388       | 100.374.873          |
| Conformación: sub-rasante                 | m2  | 68.130 | 1.662        | 113.211.110          |
| Sub-base                                  | m3  | 4.917  | 87.870       | 432.054.884          |
| Base                                      | m3  | 13.639 | 92.251       | 1.258.216.319        |
| Imprimación                               | m2  | 99.760 | 1.440        | 143.654.818          |
| Carpeta asfáltica                         | m3  | 6.615  | 413.055      | 2.732.357.266        |
| Cunetas en concreto                       | m   | 1.919  | 34.822       | 66.815.634           |
| Encoles y descoles                        | m3  | 45,9   | 618.256      | 28.377.950           |
| Tubería de concreto reforzado de 900 mm   | m   | 137    | 361.701      | 49.589.167           |
| Líneas de demarcación con pintura en frío | m   | 17.867 | 1.780        | 31.803.260           |
|                                           |     |        | <b>Total</b> | <b>4.956.455.281</b> |

Fuente: Los autores

Tabla 3 y corresponden al 86,11 % del costo directo del proyecto. Los valores de la tabla son los costos directos reales tomados de las actas de liquidación del proyecto.

## 6. Desarrollo de la simulación

La modelación del proyecto se realizó en tres configuraciones como se explicó anteriormente, las configuraciones se realizaron en función de: a) El tiempo de ejecución, b) El costo directo y c) El costo total.

### 6.1. Simulación del tiempo de ejecución

Este primer modelo establece un programa de ejecución del caso de estudio que cumple con un orden lógico de ejecución de actividades (secuencias y precedencias) y de las restricciones del proceso constructivo inferidas de la bitácora de obra.

En la Tabla 4 se muestra la configuración del modelo a ejecutar, donde se establecen como variables inciertas de entrada las duraciones de las actividades, cuyos valores  $X_i$

Tabla 4.

Configuración del modelo CPM

| Id | Actividad                                  | Duración (variable) | Predecesora             |
|----|--------------------------------------------|---------------------|-------------------------|
| 1  | <b>Proyecto Timba Rio Claro</b>            | <b>SALIDA</b>       |                         |
| 2  | <b>Inicio</b>                              | 0 días              |                         |
| 3  | Excavación Cajeo                           | $X_1$               | 2                       |
| 4  | Conformación De Calzada                    | $X_2$               | 3FF+1<br>día;2FC+1 día  |
| 5  | Sub-Base Granular                          | $X_3$               | 4FF+1<br>día;2FC+2 días |
| 6  | Base Granular                              | $X_4$               | 5FF+1<br>día;2FC+3 días |
| 7  | Imprimación                                | $X_5$               | 8CC;9FF-1 día           |
| 8  | Carpeta Asfáltica                          | $X_6$               | 6FF+1<br>día;2FC+4 días |
| 9  | <b>Fin Carpeta (Hito)</b>                  | 0 días              | 8                       |
| 10 | Tubería De Concreto Reforzado              | $X_9$               | 3FF;2CC                 |
| 11 | Cajas de Encole y Cabezales (Conc.3000psi) | $X_8$               | 10                      |
| 12 | Cunetas                                    | $X_7$               | 9                       |
| 13 | Líneas De Demarcación                      | $X_{10}$            | 9                       |
| 14 | <b>Fin</b>                                 | 0 días              | 11;13;12                |

Fuente: Los autores

Tabla 5.  
Configuración del modelo de costo directo

| Descripción                                 | Und | Cant.  | V.Und<br>inciertos | V. Total |
|---------------------------------------------|-----|--------|--------------------|----------|
| Cajeo 2                                     | m3  | 5.459  | $Y_1$              |          |
| Conformación de sub-rasante 2               | m2  | 68.130 | $Y_2$              |          |
| Sub-base 2                                  | m3  | 4.917  | $Y_3$              |          |
| Base 2                                      | m3  | 13.639 | $Y_4$              |          |
| Imprimación 2                               | m2  | 99.760 | $Y_5$              |          |
| Carpeta asfáltica 2                         | m3  | 6.615  | $Y_6$              |          |
| Cunetas en concreto 2                       | m   | 1.919  | $Y_9$              |          |
| Encoles y descoles 2                        | m3  | 45,9   | $Y_8$              |          |
| Tubería de concreto reforzado de 900 mm 2   | m   | 137    | $Y_7$              |          |
| Líneas de demarcación con pintura en frio 2 | m   | 17.867 | $Y_{10}$           |          |
| Total costo directos                        |     |        |                    | Salida   |

Fuente: Los autores

están sujetos a la distribución probabilística de la duración de cada actividad. La duración total del proyecto se estableció como la variable de salida. La cual tiene una distribución probabilística resultante de los diferentes valores que toman las variables de entrada durante las iteraciones.

## 6.2. Simulación con costos directos

El modelo de simulación de costos directos se estableció con base en el presupuesto de ejecución del caso de estudio, el cual contiene todas las actividades contempladas en el cronograma de obra y en el acta de liquidación.

En la Tabla 5 se muestra la configuración del modelo a ejecutar, donde se establecen como variables inciertas de entrada los costos unitarios  $Y_i$  de las actividades, sujetos a distribuciones probabilísticas construidas con los datos recolectados. El costo total directo del proyecto se estableció como la variable de salida.

## 6.3. Simulación de costos totales

El modelo de simulación de costos totales se muestra en la Tabla 6, se establece un presupuesto de ejecución para el caso de estudio, que contiene todas las actividades contempladas en el programa de obra. Para considerar los efectos generados por los costos administrativos en función del tiempo se hizo necesario calcular los costos administrativos diarios.

Los costos unitarios de las actividades se establecieron como variables inciertas de entrada, las cuales están sujetas a unas funciones de probabilidad. La duración del proyecto en este modelo se convierte en una variable parametrizada por los resultados de la modelación del tiempo, que multiplicado con el costo unitario diario de la administración genera la variable del costo administrativo. El costo total del proyecto se estableció como la variable de salida.

## 7. Análisis de los resultados

### 7.1. Análisis del tiempo de ejecución de la obra

La distribución obtenida para la duración del proyecto se muestra en la Fig. 2, la distribución presenta un sesgo hacia

la izquierda con un 90% de las posibles duraciones del proyecto entre 142 y 274 días. La curva de probabilidad acumula (Fig. 3) indica que la probabilidad de que el proyecto tenga una duración inferior a 142 días es del orden del 1%, mientras que la probabilidad concluir el proyecto antes de 274 días supera el 95%.

Dada la variabilidad de los datos se puede establecer un nivel de riesgo al momento de definir una duración estimada del proyecto que garantice una contingencia [12]. Si se selecciona una probabilidad del 80% de cumplir con la duración del proyecto, la duración sería de 220 días. Lo que implicaría un riesgo del 20 % de superar esta duración. En otras palabras, si se define una duración de 220 días (cerca de 32 semanas), se tendría una probabilidad del 80 % de entregar la obra a tiempo.

Los datos muestran que era muy poco probable terminar la obra con la duración con la que fue programada inicialmente de 150 días. La Fig. 3 indica que la probabilidad de terminar la obra con una duración igual o inferior a 150 días era inferior al 10%.

Tabla 6.  
Configuración del modelo de costo directo más administración.

| Descripción                                 | Und                     | Cant.                              | V.Und<br>inciertos | V. total |
|---------------------------------------------|-------------------------|------------------------------------|--------------------|----------|
| Cajeo 2                                     | m3                      | 5459                               | $Y_1$              |          |
| Conformación de sub-rasante 2               | m2                      | 68130                              | $Y_2$              |          |
| Sub-base 2                                  | m3                      | 4917                               | $Y_3$              |          |
| Base 2                                      | m3                      | 13639                              | $Y_4$              |          |
| Imprimación 2                               | m2                      | 99760                              | $Y_5$              |          |
| Carpeta asfáltica 2                         | m3                      | 6615                               | $Y_6$              |          |
| Cunetas en concreto 2                       | m                       | 1919                               | $Y_9$              |          |
| Encoles y descoles 2                        | m3                      | 45,9                               | $Y_8$              |          |
| Tubería de concreto reforzado de 900 mm 2   | m                       | 137                                | $Y_7$              |          |
| Líneas de demarcación con pintura en frio 2 | m                       | 17867                              | $Y_{10}$           |          |
| Total costo directos                        |                         |                                    |                    |          |
| Administrativos                             | Duración proyecto<br>Z1 | Costo unitario día<br>2.395.437,50 | Costos adminis.    |          |
| Total total                                 |                         |                                    |                    | Salida   |

Fuente: Los autores

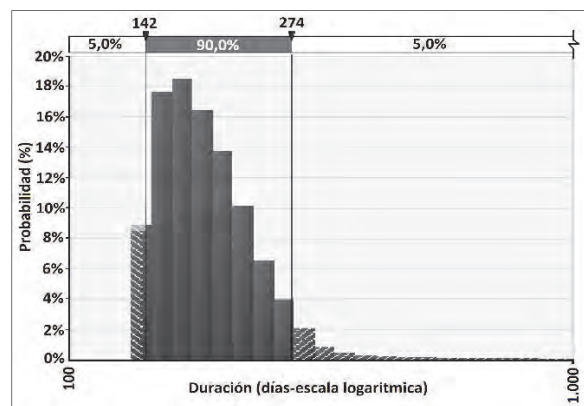


Figura 2 Probabilidad de ocurrencia la duración del proyecto.  
Fuente: Los autores.

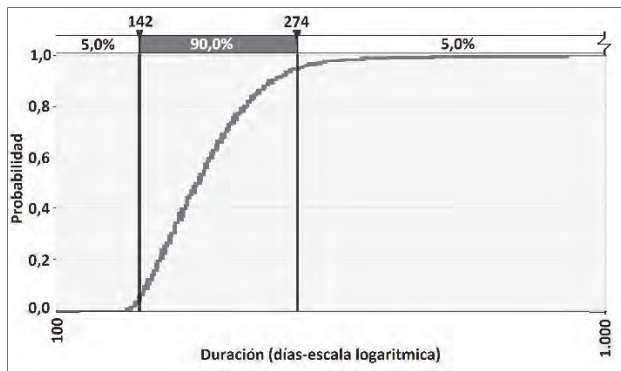


Figura 3. Probabilidad de ocurrencia acumulada del proyecto.  
Fuente: Los autores.

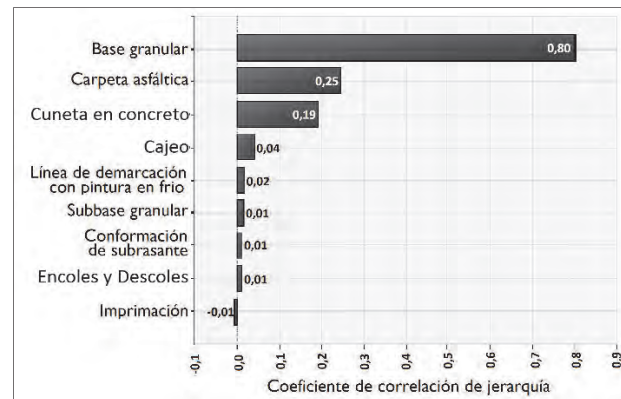


Figura 5. Coeficiente de correlación jerárquica de duración del proyecto.  
Fuente: Los autores

En la Fig. 4 se muestra el análisis de sensibilidad de las actividades con respecto a la duración del proyecto. Tomando como referencia la línea base de 194 días, que corresponde a la duración más probable. En la figura se establecen los límites superiores e inferiores del rango de duraciones posibles del proyecto que resultarían del buen o mal desempeño en ejecución de cada actividad de la obra.

La Fig. 4 muestra que las actividades con mayor incidencia en la duración del proyecto son la base granular, la carpeta asfáltica, el cajeo y las cunetas en concreto. Esto es debido a las grandes cantidades de obra a ejecutar de estas actividades y a la lógica del modelo CPM desarrollado durante la planeación de la obra. Un buen desempeño en la ejecución de la base granular podría haber reducido la duración del proyecto a casi 161 días, disminuyendo los efectos del incumplimiento en la terminación oportuna del proyecto. Por otro lado un mal desempeño en la ejecución de esta actividad podría haber incrementado la duración hasta cerca de 261 días. Las otras actividades muestran rangos inferiores, pero la eficiencia del constructor en cualquiera de ellas tendría el efecto en la duración del proyecto cuantificado en la gráfica.

En la Fig. 5 se presentan los coeficientes de correlación jerárquica de las actividades con respecto a la duración del proyecto. Entre más alto sea el valor del coeficiente más sensible es la duración del proyecto al desempeño en la ejecución de la actividad. La figura muestra que las actividades

que más incidencia tienen en la duración del proyecto son; la base granular, la carpeta asfáltica y las cunetas en concreto. Lo cual es consistente con los efectos mostrados en la Fig. 4. Sería conveniente establecer contingencias en tiempo durante la programación de actividades con estas características, de tal manera que los efectos en la duración del proyecto, de problemas en su ejecución puedan mitigarse. Es importante aclarar que el orden jerárquico de la correlación no es exactamente el mismo que el del análisis de sensibilidad debido a que la correlación depende más de la configuración del modelo de red y de la razón con la que cada variable varía.

La probabilidad que tiene cada actividad de estar en la ruta crítica del proyecto con base a los datos generados por la simulación Monte Carlo, se analiza mediante el Gantt Probabilístico que se resume en la Tabla 7. Las actividades con más probabilidad de estar en la ruta crítica son la carpeta asfáltica, la base granular y las cunetas en concreto. Esto es debido a la configuración del modelo CPM donde la ruta crítica principal está claramente definida por la cadena entre el hito de inicio, la base granular, la carpeta asfáltica y las cunetas en concreto. Igualmente con la incidencia de las mayores cantidades de obra la base granular y la carpeta asfáltica tienen en el caso de estudio. La sub-base granular, el cajeo y la conformación de sub-rasante no están dentro de la ruta crítica debido principalmente a las menores cantidades

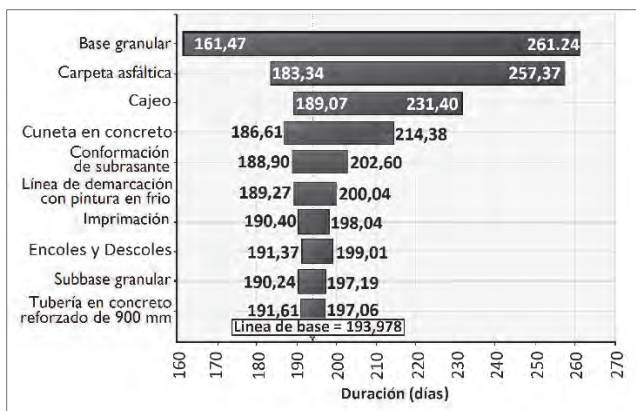


Figura 4. Sensibilidad de las actividades en la duración del proyecto.  
Fuente: Los autores.

Tabla 7.  
Análisis de Gantt Probabilístico

| Nombre de tarea                         | Índice crítico% |
|-----------------------------------------|-----------------|
| <b>Proyecto timba rio claro tramo 1</b> | <b>n/a</b>      |
| <b>Inicio</b>                           | <b>100%</b>     |
| Excavación cajeo                        | 2%              |
| Conformación de calzada (sub-rasante)   | 2%              |
| Sub-base granular                       | 2%              |
| Base granular                           | 86%             |
| Imprimación                             | 0%              |
| Carpeta asfáltica                       | 100%            |
| <b>Hito de fin carpeta</b>              | <b>100%</b>     |
| Tubería de concreto reforzado           | 0%              |
| Cajas de encoleta y cabezales           | 0%              |
| Cunetas de concreto                     | 73%             |
| Líneas de demarcación                   | 27%             |
| <b>Fin</b>                              | <b>100%</b>     |

Fuente: Los autores.

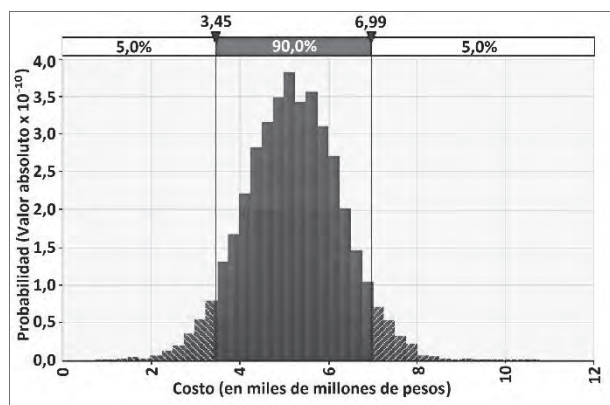


Figura 6. Probabilidad de ocurrencia del costo directo.

Fuente: Los autores

que poseen dentro en el caso de estudio. Aunque la base granular depende de estas actividades para poder ser terminada, estas pueden desarrollarse en el transcurso de la obra de manera intermitente siempre garantizando avance suficiente para que la actividad de la base granular tenga continuidad durante el proceso constructivo.

Se puede observar que los resultados del Gantt probabilístico son consistentes con el análisis de correlación de la Fig. 4.

## 7.2. Análisis del costo directo de la obra

Los resultados obtenidos de la simulación del costo directo se muestran en la Fig. 6. El resultado de la simulación tuvo un costo directo promedio de \$ 5.213.042.817 que corresponde al costo directo más probable para el caso de estudio. La distribución presenta una mediana de \$ 5.207.317.306 que indica un ligero sesgo positivo de los datos.

En la Fig. 7 se muestran los resultados acumulados del costo directo del proyecto versus su probabilidad de ocurrencia. Si para definir una contingencia se tomará una probabilidad de ocurrencia del 80%, el costo probable sería de \$ 6.111.745.013, que comparado con el costo directo real que tuvo el proyecto de \$5.756'123.005, difiere tan solo en \$

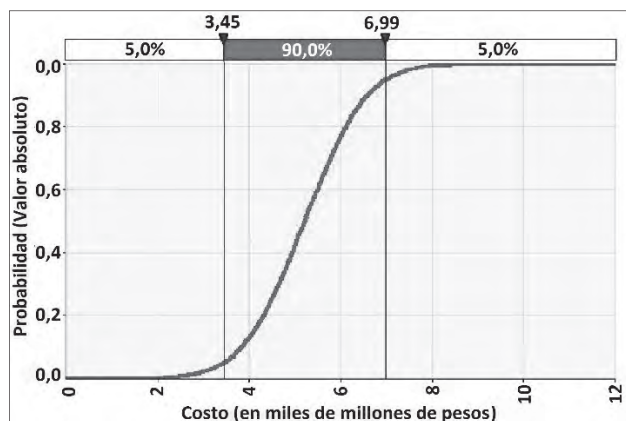


Figura 7. Probabilidad de ocurrencia acumulada del costo directo.

Fuente: Los autores.

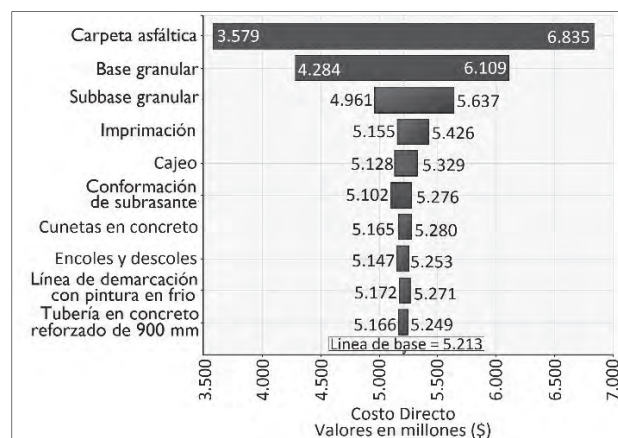


Figura 8. Análisis de sensibilidad del costo directo.

Fuente: Los autores.

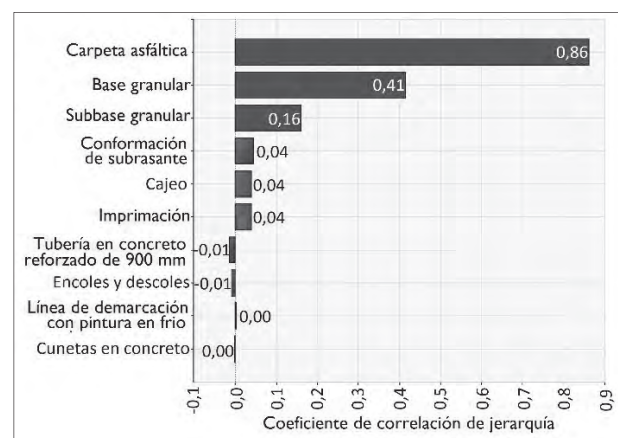


Figura 9. Coeficiente de correlación jerárquica del costo directo.

Fuente: Los autores.

350.622.008, que sería un buen referente en nuestro medio. Sin embargo, un mejor desempeño en la ejecución de la obra hubiera permitido ahorros del orden de los \$ 543.080.188.

La Fig. 8 indica que las actividades con mayor incidencia en costo directo del proyecto son la carpeta asfáltica, la base granular y la sub-base granular, lo cual se explica por el alto costo unitario de estas actividades.

En la Fig. 9 se establecen los coeficientes de correlación del costo de las actividades con respecto al costo directo total del proyecto. La grafica confirma la alta incidencia que tienen en el costo directo las actividades carpeta asfáltica, base granular y sub-base. Lo que le indicaría al constructor poner especial cuidado en el control de la ejecución de estas actividades para tener mejores resultados en la gestión de costos del proyecto, con posibilidad de lograr costos directos finales incluso inferiores al costo más probable definido como línea base en la Fig. 8.

## 7.3. Análisis del costo total de la obra

La Fig. 10 muestra la distribución del costo total con la probabilidad de ocurrencia. La simulación indica que el valor

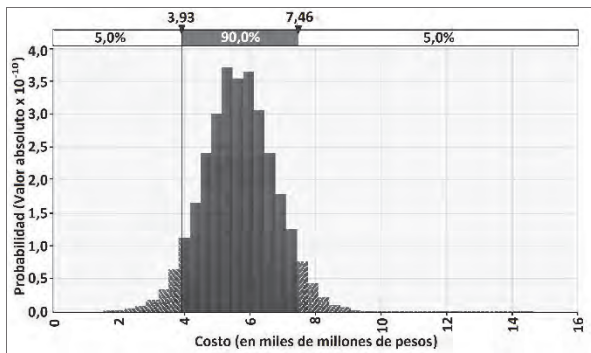


Figura 10. Probabilidad de ocurrencia costo directo más administración.  
Fuente: Los autores.

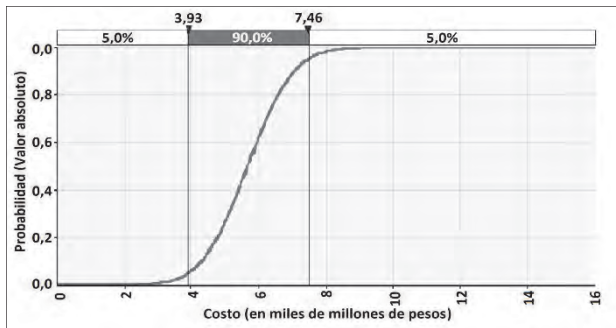


Figura 11. Probabilidad acumulada de duración del proyecto.  
Fuente: Los autores.

más probable es \$ 5.675.449.753. La similitud de la mediana de \$ 5.667.515.758 con respecto a la media, es indicativo de una distribución casi simétrica.

La curva de probabilidad acumulada del costo directo (Fig. 11) muestra que para una probabilidad de ocurrencia del 80%, el costo directo total asciende a \$6.577.027.996, que comparado con el costo total más probable tiene una diferencia de \$ 901.578.243 lo que es bastante significativo.

Si se compara el valor de \$6.577.027.996 con el costo real que tuvo el proyecto \$7.569'301.751, la diferencia de \$ 992.273.755 es muy significativa. Lo que hace evidente que el buen desempeño en la ejecución del proyecto tiene efectos importantes en los costos totales de la obra, incluso mayor que cuando se analizan únicamente los costos directos. Es claro que los costos administrativos son una función de la duración de la obra y los beneficios de terminar el proyecto más pronto son evidentes.

En la Fig. 12 se muestra la sensibilidad de las actividades con respecto al costo total del proyecto, se establece el costo más probable como línea base. Las actividades con más incidencia en el costo total del proyecto son la carpeta asfáltica, la base granular y la sub-base.

Adicionalmente se evaluó el efecto de los costos administrativos que ocupan la cuarta posición en sensibilidad sobre los costos totales del proyecto. Se observa que los costos administrativos, que están en función del tiempo total de ejecución del proyecto, son un factor que afecta de manera significativa el costo total de la obra.

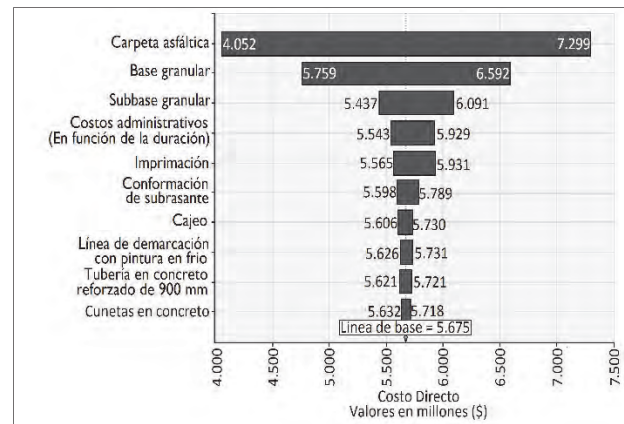


Figura 12. Sensibilidad del costo total a las actividades.  
Fuente: Los autores.

## 8. Análisis de las causas

Para el análisis de causas se utilizaron los registros históricos recolectados para el desarrollo de los modelos para identificar por medio de las bitácoras, documentos de obra y actas, los eventos que afectaron de manera directa el costo o la duración de las actividades que componen el proyecto en estudio.

Con base en los datos obtenidos se establecen algunas causas que impactan los rendimientos de algunas actividades. Las causas se clasificaron como eventos exógenos aquellos sobre los que el constructor no se tiene control y eventos endógenos aquellos que pueden ser controlados por el constructor [13,14].

- Lluvias: Son evento meteorológico catalogado como una causa exógena que genera retraso en las actividades analizadas.
- Daños mecánicos: Este evento se refiere a los daños en los equipos que se utilizan en el desarrollo de las actividades, son catalogados como una causa endógena de retraso en la ejecución de las actividades.
- Especificaciones Técnicas: Este evento está asociado a los cambios de especificaciones técnicas en el desarrollo de una actividad, como por ejemplo un cambio inesperado en el trazado de la vía, un ajuste al diseño de mezcla asfáltica o problemas de calidad en los materiales. Este evento es catalogado como una causa endógena de retraso en la ejecución de la actividad.
- Falta de personal: Este evento se refiere a la falta de personal que se van a desarrollar las actividades, es catalogado como una causa endógena de retraso en la ejecución de la actividad.
- Falta de suministro: Este evento se refiere a la falta del suministro de material que se va a utilizar en las actividades, catalogado como una causa endógena de retraso en la ejecución de la actividad.

De las 5 principales causas identificadas, 4 son eventos endógenos que pueden ser controlados por el constructor con una buena gestión del proyecto. Lo que representaría un mejor desempeño en la ejecución, con la posibilidad acercar la ejecución a las duraciones y costos menores.

Tabla 8.  
Matriz de causas que afectan la duración de las actividades

| Actividad                                 | causa de retrasos |                |                   |                   |                     |
|-------------------------------------------|-------------------|----------------|-------------------|-------------------|---------------------|
|                                           | Lluvia            | Daño mecánico. | Especif. Técnicas | Falta de personal | Falta de suministro |
| Cajeo                                     | X                 | X              | X                 |                   |                     |
| Base granular                             | X                 | X              | X                 |                   |                     |
| Carpeta asfáltica                         | X                 | X              | X                 | X                 | X                   |
| Conformación de subrasante                | X                 |                | X                 |                   |                     |
| Cuneta de concreto                        | X                 |                |                   | X                 |                     |
| Encolee y descolee (concreto)             | X                 |                |                   |                   |                     |
| Imprimación                               | X                 |                |                   |                   |                     |
| Líneas de demarcación con pintura en frío | X                 |                |                   |                   |                     |
| Sub-Base                                  | X                 | X              | X                 |                   |                     |
| Tubería de concreto reforzado de 900 mm   | X                 |                |                   |                   |                     |

Fuente: Los autores.

Con la información obtenida de los registros de las bitácoras de los proyectos estudiados, se pudo determinar que las causas anteriormente identificadas afectan principalmente las actividades de cajeo, base granular, sub-base granular y carpeta asfáltica (Tabla 8). Estas tres últimas identificadas en la simulación como las más sensibles con respecto al tiempo y costo de proyecto. Al tener causas en su mayoría endógenas, los problemas en el proyecto pueden ser mitigados por el constructor con una buena gestión del proyecto.

Otras causas que tienen alta incidencia en los costos totales de la construcción fueron las siguientes:

- Transporte de equipos: Incremento de costos de las actividades por el transporte de la maquinaria pesada al lugar de ejecución del proyecto.
- Acarreos: Incremento del costo de los insumos por efecto del transporte de material desde la planta de producción hasta la obra, principalmente para las actividades de base granular, sub-base y carpeta asfáltica.
- Retiro de material: Incremento del costo del retiro del material de excavación por el efecto de la distancia entre el botadero y la obra durante la ejecución del cajeo.

## 9. Comparativo entre los resultados de la simulación y los resultados reales de la obra

Cuando se comparan los resultados de la simulación, con los resultados reales de construcción del caso de estudio, se tiene que la duración real que tuvo el proyecto, de 194 días, es mucho mayor que la duración inicialmente programada de 150 días. Como se mostró anteriormente en la simulación, una duración de 150 días tenía menos del 10% de

probabilidad de éxito, lo que explica en gran parte la terminación tardía del proyecto. En lo referente al costo total del proyecto (Figs. 11 y 12) la probabilidad de que el costo del proyecto fuera inferior al costo real de \$7.569'301.751 supera el 90%. De hecho el costo real supera ampliamente el costo más probable de \$ 5.675.449.753. La comparación evidencia una construcción con pobre desempeño en costo y pobre desempeño en duración, situación que pudo evitarse con un buen proceso de gestión del proyecto.

## 10. Conclusiones

Los datos del presente estudio indican que los efectos de la incertidumbre en la programación de los proyectos de construcción de infraestructura vial pueden llegar a ser muy significativos, tanto en costo como en la duración final de las obras. Se debe tener un especial cuidado en la programación inicial, en especial en la estimación de las duraciones y el costo de las actividades del proyecto.

Se encontró que el caso de estudio había sido programado inicialmente con una duración con muy bajas probabilidades de cumplir, lo cual resultó en demoras y tuvo alta incidencia en el incremento del costo final del proyecto.

Las actividades más sensibles en relación con la duración para el caso estudiado fueron la base granular, la carpeta asfáltica, el cajeo y las cunetas en concreto. Los problemas en la ejecución de estas actividades producen las mayores variaciones en la duración total del proyecto. Lo que implica que estas actividades requieren especial atención en el proceso de ejecución con el fin minimizar demoras en la finalización del proyecto.

La carpeta asfáltica, la base granular y las cunetas en concreto presentaron el mayor índice crítico con 100%, 86% y 73% respectivamente, lo cual indica que estas tienden a permanecer en la ruta crítica dentro de los diversos escenarios planteados en la simulación, lo que confirma la importancia del seguimiento que se le debe hacer a estas actividades.

En cuanto al costo directo, las actividades con mayor influencia en su variación fueron la carpeta asfáltica, la base granular y la sub-base granular. Estas actividades requieren un estricto control de costos durante su ejecución con el fin de limitar sobrecostos considerables. Estas mismas actividades tienen los mayores efectos en los costos administrativos, considerando que estos aumentan con la mayor duración del proyecto.

Establecidos los impactos que pueden generar estas variables en el caso de estudio, es importante establecer las posibles contingencias con el fin de reducir el nivel de riesgo que se quiere asumir a la hora de ejecutar un proyecto. Para el caso de estudio se observó que una recomendación de establecer una probabilidad de ocurrencia del 80% hubiera sido adecuada tanto en la duración como en el costo total del proyecto.

En relación con las causas de las demoras y sobre costos, se pudo establecer que la mayoría de estas causas son endógenas, es decir están dentro de las posibilidades de control del constructor. Las principales causas endógenas identificadas fueron los daños mecánicos, los problemas con especificaciones técnicas, la falta de personal y la falta de suministro. La lluvia fue la única causa exógena identificada.

La lluvia es la principal causa de demoras en este tipo de obras, afectando actividades de cajeo, base granular, sub-base y carpeta asfáltica, las cuales fueron las actividades de mayor coeficiente de categorización jerárquica, lo que implica que un análisis juicioso de las condiciones climáticas del sitio del proyecto resultaría muy beneficioso en la etapa de programación.

Se identificó alta incidencia del costo de acarreo de materiales para el caso de las actividades de base granular, sub-base granular y la carpeta asfáltica. Los acarreos se identificaron como una causa importante en el incremento del costo final de proyecto, debido a que el costo del transporte de los insumos está en función de la distancia. Similar situación se identificó para el acarreo de materiales de desecho al botadero.

## Referencias

- [1] Schattelman, D., Herroelen, W., Van de Vonder, S., and Boone A., Methodology for integrated risk management and proactive scheduling of construction projects. *Journal of Construction Engineering and Management* 134 (11), pp. 885-893. 2008. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2008)134:11(885)
- [2] Martínez, G., Moreno, B. y Rubio, M.delC., Gestión del riesgo en proyectos de ingeniería. El caso del campus universitario PTS. Universidad de Granada (España). *DYNA rev.fac.nac.minas, Medellín*, 79 (173), pp. 7-14, 2012.
- [3] Barraza, G.A. and Bueno, R.A., Probabilistic control of project performance using control limit curves. *Journal of Construction Engineering and Management* 133 (12), pp. 957-965. 2007. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2007\)133:12\(957\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2007)133:12(957))
- [4] Flanagan, R. and Norman, G., Risk management and construction. 2. London: Blackwell Science, 2011.
- [5] Al-Bahar, J.F. and Crandall, K.C., Systematic risk management approach for construction projects. *Journal of Construction Engineering and Management* 116 (3), pp. 533-546. 1990. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(1990)116:3(533)
- [6] López, J.C., Guía básica para la simulación de Monte Carlo. 1ª ed Madrid. AENOR, 2008.
- [7] Haldar, A. and Sankaran, M., Probability, reliability, and statistical methods in engineering design. 1ª ed. New York. John Wiley & Sons, 2000.
- [8] Barraza, G.A., Back, W.E. and Mata, F., Probabilistic forecasting of project performance using stochastic S curves. *Journal of Construction Engineering and Management* 130 (1), pp. 25-32. 2004. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2004)130:1(25)
- [9] Ang, A.H.S y Tang, W.H., Probability concepts in engineering: Emphasis on applications to civil and environmental engineering. 2ª ed. New York: Wiley, 2006.
- [10] Nguyen, L., Phan, D. and Tang, L., Simulating construction duration for multistory buildings with controlling activities. *Journal of Construction Engineering and Management* 139 (8), pp. 951-959. 2013. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000677
- [11] Corporation, Palisade. Risk 6.1. Integrated Excel program that performs risk analysis using Monte Carlo simulation. 2013.
- [12] Vose, D., Risk analysis: A quantitative guide. New York. John Wiley & Sons, 2008.
- [13] Olsen, T.E. and Osmundsen P., Sharing of endogenous risk in construction. *Journal of Economic Behavior & Organization* 58 (4), PP. 511-526. 2005. DOI:10.1016/J.JEBO.2003.09.019
- [14] Luu, V.T., Kim S.Y., Nguyen, V.T. and Ogunlana S.O., Quantifying schedule risk in construction projects using Bayesian belief networks. *International Journal of Project Management*, 27 (1), pp. 39-50. 2009. DOI: 10.1016/J.IJPROMAN.2008.03.003

**A. Orobio**, es PhD. en Ing. Civil de West Virginia University, USA. Ing. Civil y MSc. en Infraestructura Vial de la Universidad del Cauca, Colombia. Profesor titular de la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática de la Universidad del Valle, Cali, Colombia.  
ORCID: 0000-0001-7166-3061|

**H.D. Gómez**, es Ing. Civil y MSc. en Ingeniería Civil de la Universidad del Valle, Cali, Colombia. Es gerente de proyectos de construcción en la empresa Construcciones Arquitectonicas Ingeniería S.A.S. de Cali, Colombia.  
ORCID: 0000-0002-5602-4648



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN  
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería Civil

Oferta de Posgrados

Especialización en Vías y Transportes  
Especialización en Estructuras  
Maestría en Ingeniería - Infraestructura y Sistemas  
de Transporte  
Maestría en Ingeniería – Geotecnia  
Doctorado en Ingeniería - Ingeniería Civil

Mayor información:

E-mail: [asisacic\\_med@unal.edu.co](mailto:asisacic_med@unal.edu.co)  
Teléfono: (57-4) 425 5172

# Mining unstructured data to support requirements elicitation by using controlled vocabularies: A systematic mapping study

José L. Barros-Justo <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Escuela Superior de Ingeniería Informática, Universidad de Vigo, Ourense, España. [jbarros@uvigo.es](mailto:jbarros@uvigo.es)

Received: December 17<sup>th</sup>, 2014. Received in revised form: May 20<sup>th</sup>, 2015. Accepted: May 27<sup>th</sup>, 2015.

## Abstract

This paper presents a work-in-progress that deals with the assessment of the use of controlled vocabularies during the processes of requirements engineering, as a means to mine data from different sources (interviews, contracts, schemas and diagrams). By doing this the requirements description, analysis and comprehension is facilitated for both developers and end users. As a research methodology, we decided to use a systematic mapping study covering the last fourteen years (2000 - 2014). As far as we know, such studies have not yet been done; however, the cost incurred from errors in the requirements elicitation phase is one of the problems that is most commonly reported by the practitioners. Our study includes data on the processes of building the controlled vocabulary and assesses the productivity and quality. We are also interested in tools and techniques to classify and retrieve information. Our first findings suggest that this is an under-research area.

**Keywords:** Unstructured data; requirements elicitation; controlled vocabularies; systematic mapping study.

# Minería de datos sin estructura para el soporte de la adquisición de requerimientos mediante el uso de vocabularios controlados: Un estudio de mapeo sistemático

## Resumen

Este trabajo muestra un trabajo en progreso relacionado con la evaluación del uso de vocabularios controlados durante los procesos de ingeniería de requisitos, como un medio para obtener datos de muy diferentes fuentes (entrevistas, contratos, esquemas y diagramas) y, al hacer esto, facilitar la descripción de requisitos, el análisis y la comprensión por los desarrolladores y usuarios finales. Como metodología de investigación se decidió utilizar un estudio sistemático de mapeo que abarca los últimos catorce años (2000-2014). Por lo que sabemos no existen estudios previos de este tipo, sin embargo, el coste producido por errores en la fase de obtención de requisitos es uno de los problemas más mencionados por los profesionales. Nuestro estudio incluye datos sobre los procesos de construcción del vocabulario y evalúa la productividad y la calidad. También estamos interesados en las herramientas y técnicas utilizadas para clasificar y recuperar información. Nuestros primeros resultados sugieren que esta es un área de investigación sub-estudiada.

**Palabras clave:** Datos no estructurados; obtención de requerimientos; vocabularios controlados; estudio de mapeo sistemático.

## 1. Introduction

Over the last few decades, Software Engineering (SE) has become increasingly popular among software developers as an effective method to plan and document all the software development processes that have led to high quality products. Using the Unified Modeling Language (UML), programmers

can deal with different types of software artifacts, employing a suitable and widely accepted representation formalism [1], which may incorporate: use case descriptions, diagrams and other relevant artifacts [2]. The use of common definitions, terms and keys, including dictionaries, vocabularies and ontologies are also an extended practice. All these strategies that comprise requirement analysis, planning and project

documentation, can reduce most of the error costs that emerge during the software development process [3].

One of the most important problems that may arise when developing software is the fact that, on many occasions, documentation is constructed employing vocabulary and term descriptions that are not as standardized as is desirable and not all the stakeholders are familiar with them. Moreover, a term may denote more than one concept, and this can lead to ambiguity, as well as the opposite (synonymy): more than one term can denote a unique concept [4].

In order to unify the definitions and terms for a specific project, several authors have proposed the use of controlled vocabularies, as a way to create narratives that could be used for a wide range of individuals involved in the software project. This could lead to the creation of more usable and maintainable software applications [5-7].

However, a problem remains; there is an abundance (sometimes overwhelming) of unstructured data that should, in some way, be transformed to become useful and understandable. This abundance is due to three main reasons:

- A group of heterogeneous participants with (frequently) divergent goals: end users, developers, business people, competitors, market experts, governments, etc.
- Many data/information sources: text documents, forms, video feeds, interviews recordings, regulations, books, rules, methodologies, bug reports, international standards, code comments, user manuals, maintenance documentation, etc.
- The lack of widely accepted techniques and associated tools to deal with this mass of data. Researchers have offered all kinds of theoretical tools such as: data and text mining, information retrieval, natural language

processing, controlled vocabularies and ontologies, and modeling languages, but none of these has won the favor of all stakeholders.

Keeping this in mind, we present this preliminary work aimed at assessing the use of controlled vocabularies as a tool to transform unstructured data, collected during the stage of requirements engineering (mainly requirements elicitation) into useful knowledge, contributing to develop high quality software and documentation, thus avoiding some costs due to misunderstandings and shortened development time.

The rest of the paper is organized as follows: Section 2 presents several prior studies dedicated to the topics of interest (mapping studies, unstructured data, requirements engineering and controlled vocabularies); Section 3 explains the goal and proposed methodology; finally, Section 4 presents main conclusions of this ongoing work, as well as guidelines for further investigation.

## 2. Related work

In recent years, the problem of facilitating the understanding of the requirements by all stakeholders and reducing the risk of misunderstandings has been thoroughly dealt with in the literature. However, it still remains a real problem and more detailed research is needed from academia. Requirements are often ambiguous, incomplete, or even contradictory. One cause of this problem is miscommunication between analysts and users. In their work, Meth, Brhel and Maedche [8] analyze in detail 36 relevant publications in the area of automatic elicitation of requirements. They prove that there is a lot of text that is not clearly structured, coming from different stakeholders and part of large software development projects. All these documents must be analyzed and, finally, transformed into well-structured specification requirements.

As Al-Fedaghi stated, [9] UML is clearly inappropriate for non-technical users (clients and end users in the business sector), even for developers, as the specification of UML still contains ambiguous terms and shows a lack of a conceptual model that provides a common basis for understanding.

Michael H. Hugos uses five diagrams, among which four are classic and one is modern, in order to confront the problems in communication between developers and users (business users). The problem lies not so much in the text itself, but in that ambiguous mass of words and abstractions called UML [10].

Moreover, Durdik and Reussner [11] highlight the fact that during the system design, many decisions are made without sufficient information, due to lack of documentation. This leads to wrong decisions, which, in turn, affect the construction phase of the system. These design errors are the causes of customer and end user dissatisfaction, low quality applications and cost overruns in the development process. A similar case, involving students doing a Master's in computer science, is reported in the work of Scanniello et al. [12]. Researchers carried out a controlled experiment to verify the impact of the documentation available on design patterns for software maintenance activities.

Although specialized vocabularies have repeatedly proven their utility in the recovery of information, the

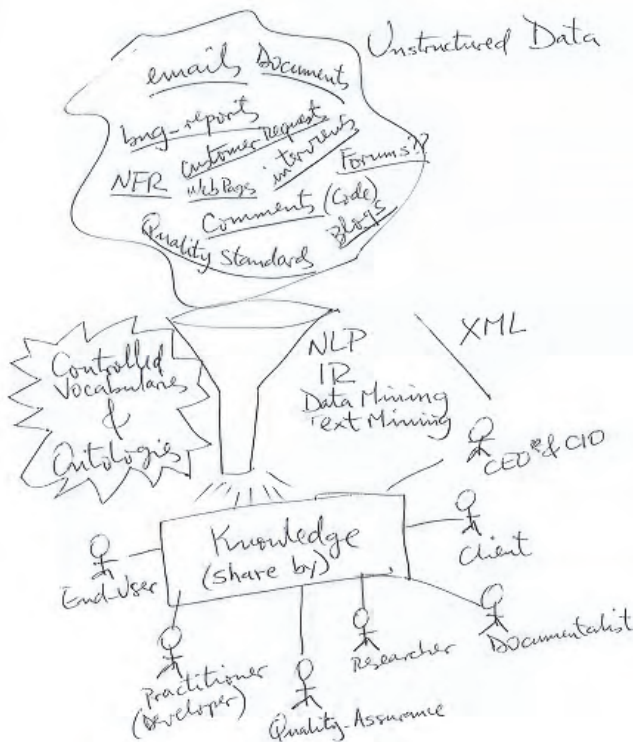


Figure 1 Transforming Unstructured Data into Useful Knowledge  
Source: The Author

organization of the documentation and the understanding of natural language, their construction and the underlying taxonomies and ontologies is a complex process that consumes time and effort. This is not only during the initial phase of construction, but throughout their lifecycle; they require regular and frequent maintenance and upgrades. Current research is therefore focused on the automation of these creation and maintenance processes, by means of the semi-automatic extraction of information from collections of documents, databases, the Internet and the web, expert opinions and from many other sources [4]. Ontologies have also been proposed as a mechanism to recover information, in particular for the retrieval and potential reuse of UML class diagrams [13].

Pagano and Bruegge [14] reported on the need to have tools that can provide support to consolidation, structuring, analysis and monitoring processes of the information feedback, which occurs once the system is delivered to the end users. One recent work [5] highlights the fact that language, used in the specification of the system's functional requirements, can determine the value of the use cases that are employed to design the user interface.

Finally, Zapata and Vargas [24] recognized that organizational problems during requirements elicitation need to be traced to organizational goals. However, at the present time, this trace is based on stakeholder's experience. They propose a method composed by semantic and syntactic rules to express the organizational problem (requirement) in terms of goal statements.

### 3. Goals and methodology

Our work has two aims. First, we want to assess whether the use of controlled vocabularies during requirements elicitation is efficient, i.e., whether it is worth the effort that needs to be dedicated to building the vocabulary regarding expected revenue potential for improvements in the quality of the final product (software system). Additionally, we want to know the state of the art in relation to the existence of techniques and tools to automate (or at least facilitate) the mining of unstructured data and its transformation into structured and useful knowledge that will be shared by the stakeholders through all phases of the software development life cycle.

We conducted a systematic mapping study [15,16] in order to analyze the current published literature relating to the use of controlled vocabularies to facilitate the requirements in the elicitation process, especially when dealing with unstructured data.

The essential process steps of our systematic mapping study, as suggested by Petersen [17], are: defining research questions, conducting the search for relevant papers, screening papers, keywording of abstracts and data extraction and mapping. Each process step has an outcome, the final outcome of the process being the systematic map.

We would like to gain deeper knowledge by answering the following research questions:

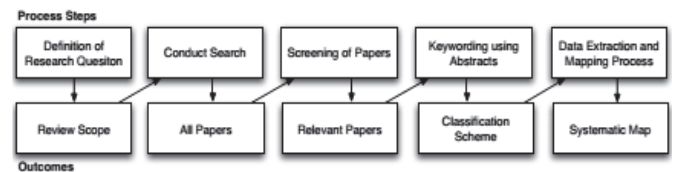


Figure 2. Systematic mapping process steps

Source: Petersen, 2008

1. What are the current techniques and tools for mining unstructured data during requirements elicitation? What is their level of automation?
2. Can controlled vocabularies really facilitate the requirements elicitation process when dealing with unstructured data? Is there any empirical evidence? Is the effort dedicated to building vocabularies worthwhile given the expected benefits?

We included all the literature produced between 2000 and 2014 in our study that was published in scientific journals, magazines, conferences and workshops. It is especially interesting to assess the method, technique or tool used by researchers to validate their own work [18], so we checked whether this validation process was carried out, and, if so, how [19-20]. For example, before selecting the evaluation method to be used to prove the correctness and completeness [21] of each particular vocabulary, some of the techniques reported in the literature have been analyzed. Hevner et al. [22] undertook a controlled experiment, and the method was validated in a controlled environment. A simulation process was also used by the same authors, who employed outputs created by different expert groups. This second option was also used by Tena et al. [5], who employed evaluation measures based on experts' opinions.

The main contributions of our work are:

1. A systematic mapping study of the use of controlled vocabularies to support the requirements elicitation when dealing with unstructured data, and structuring research from the last fourteen years by analyzing published literature (specialized journals and conferences, peer-reviewed sources).
2. A detailed research protocol that includes: search strategy, definition of inclusion/exclusion criteria and data extraction guidelines to properly classify and analyze the retrieved works.
3. A set of bibliometric measures to map the current research field (state of the art), both at a research space level and at a publication space level.
4. Detection of research gaps and suggestions for further studies and promising new areas of research.

### 4. Threats to validity

There are many limitations to this study. From the viewpoint of the search process:

- It is based on a restricted set of indexing systems. We have used SCOPUS<sup>1</sup>, a particularly useful system as it indexes publications from a large number of publishers

<sup>1</sup> <http://www.scopus.com>

including ACM, IEEE, Elsevier, and Springer. We also used Web of Knowledge (WoS<sup>2</sup>) and IEEE Xplore<sup>3</sup>, both having significant overlap. Finally, Google Scholar<sup>4</sup> pretends to index all the sources covered by the others systems, but after some tests we found this not to be true.

- The search was based on a restricted set of terms and perhaps missed topics that might normally be considered to be unstructured data or mining techniques. We tried to limit the possible threat by using synonyms, but it is clearly not an exhaustive solution.
- The search string was applied to a restricted set of elements in the paper: title, abstract and keywords. Although it is reasonable to think that if the search terms are not present in these elements then the content of the paper is not relevant to the study, this cannot be formally proved.
- Publication bias for internal validity: Successful cases are probably published more often than failures, and significant results may be published more often than when the results are not considered to be so significant.

To obtain a set of relevant papers that ensured good coverage of the area of interest, we constructed the search strings incrementally, starting with the broader term controlled vocabularies. The search was then refined by applying more specialized terms, particularly those which made it possible to reduce the search space to the area of interest (unstructured data and requirements elicitation). These terms were agreed upon by the authors as being the most representative; however, the list of search terms may not be complete, and additional or alternative terms (synonyms) in the search string could affect the number of papers retrieved by the databases.

After completing the search process, retrieved papers were distributed randomly among two external reviewers and the author. Each author received an even number of papers, half exclusively and the other half in duplicate (another reviewer received the same sample), as the extraction of data needed to happen independently, without communication between reviewers. Duplicate documents allow us to cross-check data retrieved from each paper. The cross-check also helped us increase the reliability of data and mitigate, as far as possible, threats to the validity of our study.

Regarding the external validity and the conclusions, we believe it is important to offer other researchers the data and details on the selection and extraction processes, so as they can replicate the study and check the results. Thus, we plan to provide researchers with an online repository with all the data of our mapping. Given the systematic approach we have followed for all the processes, we believe our study is easily repeatable.

## 5. Conclusions and future research

This is an ongoing research project and we are still in the first stages of extracting and analyzing data, and expanding the initial search by including references from previous selected papers and citations that other authors have made to

papers in the original selected set (Snow balling technique). We have followed an extended version of the formal process proposed by Kitchenham [16] and Wohlin [23] when carrying out a systematic mapping study.

So far we have been able to identify three important elements for our study: frequent uses of controlled vocabularies, potential sources of data (and vocabulary terms) and mining techniques frequently used when dealing with unstructured data.

Our initial set of pre-selected studies consists of 226 papers (from specialized journals and main international conferences), but we were unable to find any systematic mapping study related to unstructured data. This encourages us to continue with our aim of carrying out this type of formal research. We are now working in the inclusion/exclusion criteria and the classification schema.

## References

- [1] Rumbaugh, J., Jacobson, I. and Booch, G., The unified modeling language: Reference manual. Addison Wesley, 2005.
- [2] Sommerville, I., Software engineering. Pearson education, 2008.
- [3] Urquhart, C., Themes in early requirements gathering: The case of the analyst, the client and the student assistance scheme. *Information Technology & People*, 12, pp. 44-70, 1999. DOI: 10.1108/09593849910250547
- [4] Medelyan, O., Witten, I., Divoli, A. and Broekstra, J., Automatic construction of lexicons, taxonomies, ontologies, and other knowledge structures. *WIREs Data mining Knowl Discov*, 00, 2013. DOI: 10.1002/widm.1097
- [5] Tena, S., Díez, D., Díaz, P. and Aedo, I., Standardizing the narrative of use cases: A controlled vocabulary of web user tasks. *Information and Software Technology*, 55, pp. 1580-1589, 2013. DOI: 10.1016/j.infsof.2013.02.012
- [6] Bleik, S., Mishra, M., Huan, J. and Song, M., Text categorization of biomedical data sets using graph kernels and a controlled vocabulary. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 10, pp. 1211-1217, 2013. DOI: 10.1109/TCBB.2013.16
- [7] Liu, M., Halper, M., Geller, J. and Perl, Y., Using OODB modelling to partition a vocabulary into structurally and semantically uniform concept groups. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 14, pp. 850-866, 2002. DOI: 10.1109/TKDE.2002.1019218
- [8] Meth, H., Brhel, M. and Maedche, A., The state of the art in automated requirements elicitation. *Information and Software Technology*, 55, pp. 1695-1709, 2013. DOI: 10.1016/j.infsof.2013.03.008
- [9] Al-Fedaghi, S., A method for modeling and facilitating understanding of user requirements in software development. *Journal of Next Generation Information Technology (JNIT)*, 4 (3), pp. 30-38, 2013. DOI: 10.4156/jnit.vol4.issue3.4
- [10] Hugos, M., Five diagrams beat a victorian novel. *Computerworld*, 41 (39), pp. 23- 23, 2007.
- [11] Durdik, Z. and Reussner, R., On the appropriate rationale for using design patterns and pattern documentation, *Proceedings of QoSA'13*, 2013. DOI: 10.1145/2465478.2465491
- [12] Scanniello, G., Gravino, C., Risi, M. and Tortora, G., A controlled experiment for assessing the contribution of design pattern documentation on software maintenance, *Proceedings of the 2010 ACM-IEEE International Symposium on Empirical Software Engineering and Measurement*, 2010. DOI: 10.1145/1852786.1852853
- [13] Robles, K., Fraga, A., Morato, J. and Llorens, J., Towards an ontology-based retrieval of UML Class Diagrams. *Information and*

<sup>2</sup> <http://www.webofknowledge.com>

<sup>3</sup> <http://ieeexplore.ieee.org>

<sup>4</sup> <http://scholar.google.es/>

- Software Technology, 54, pp. 72-86, 2012. DOI: 10.1016/j.infsof.2011.07.003
- [14] Pagano, D. and Bruegge, B., User involvement in software evolution practice: A case study, Proceedings of ICSE 2013, 2013. DOI: 10.1109/ICSE.2013.6606645
  - [15] Kitchenham, B. and Brereton, P., A systematic review of systematic review process research in software engineering. Information and Software Technology, 55, pp. 2049-2075, 2013. DOI: 10.1016/j.infsof.2013.07.010
  - [16] Kitchenham, B. and Charters, S., Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering. EBSE, 1, 2007.
  - [17] Petersen, K., Feldt, R., Mutjaba, S. and Mattsson, M., Systematic mapping studies in software engineering, Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering (EASE), 2008.
  - [18] Mader, C. and Haslhofer, B., Quality criteria for controlled web vocabularies, Proceedings of the 10<sup>th</sup> European Networked Knowledge Organisation Systems Workshop, NKOS, 2011.
  - [19] Dyba, T., Kitchenham, B. and Jorgensen, M., Evidence-based software engineering for practitioners. IEEE Software, 22 (1), pp. 58-65, 2005. DOI: 10.1109/MS.2005.6
  - [20] N.I.S. Organization., Guidelines for the construction, format, and management of monolingual controlled vocabularies. ANSI/NISO Z39.19-2005, NISO Press, 2005.
  - [21] Zowghi, D. and Gervasi, V., On the interplay between consistency, completeness, and correctness in requirements evolution. Information and Software technology, 45, pp. 993-1009, 2003.
  - [22] Hevner, A., March, S., Park, J. and Ram, S., Design science in information systems research. MIS Quarterly, 28, pp. 75-105, 2004.
  - [23] Wohlin, C., Runeson, P., Anselmo da Mota, P., Engström, E., do Caro, I. and Santana de Almeida, E., On the reliability of mapping studies in software engineering. The Journal of Systems and Software, 86, pp. 2594-2610, 2013. DOI: 10.1016/j.jss.2013.04.076
  - [24] Zapata-J., C.M. and Vargas-Agudelo, F.A., Specification of problems from the business goals in the context of early software requirements elicitation. DYNA, 81 (186), pp. 193-199, 2014. DOI: 10.15446/dyna.v81n186.39910

**J.L. Barros-Justo**, received his PhD in Informatics Eng. in 2006, from the Universidade de Vigo, Ourense, Spain. Since 1990 he has worked in the Universidade de Vigo. Previously he worked for several companies including Hewlett-Packard, I.D.E.A., Inforpyme and ALBA insurance. Currently, he is a Professor in the Informatics Department, Escuela Superior de Ingeniería Informática, Universidade de Vigo, Spain. His research interests include: software engineering, software reuse, development methodologies and evidence-based software engineering.  
ORCID: [orcid.org/0000-0003-2046-2643#sthash.Myllb7NP.dpuf](https://orcid.org/0000-0003-2046-2643#sthash.Myllb7NP.dpuf)



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN  
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería  
de Sistemas e Informática

Oferta de Posgrados

Especialización en Sistemas  
Especialización en Mercados de Energía  
Maestría en Ingeniería - Ingeniería de Sistemas  
Doctorado en Ingeniería- Sistema e Informática

Mayor información:

E-mail: [acsei\\_med@unal.edu.co](mailto:acsei_med@unal.edu.co)  
Teléfono: (57-4) 425 5365

# Development of a concept-based EMG-based speller

Robertas Damaševičius, Mindaugas Vasiljevas & Tomas Šumskas

*Software Engineering Department, Kaunas University of Technology, Kaunas, Lithuania,  
robertas.damasevicius@ktu.lt, mindaugas.vasiljevas@ktu.lt, tomas.sumskas@ktu.lt*

Received: February 18<sup>th</sup>, 2015. Received in revised form: March 16<sup>th</sup>, 2015. Accepted: September 26<sup>th</sup>, 2015

## Abstract

Physiological computing is a paradigm of computing that treats users' physiological data as input during computing tasks in an Ambient Assisted Living (AAL) environment. By monitoring, analyzing and responding to such inputs, Physiological Computing Systems (PCS) are able to respond to the users' cognitive, emotional and physical states. A specific case of PCS is Neural Computer Interface (NCI), which uses electrical signals governing users' muscular activity (EMG data) to establish a direct communication pathway between the user and a computer. We present taxonomy of speller application parameters, propose a model of PCS, and describe the development of the EMG-based speller as a benchmark application. We analyze and develop an EMG-based speller application with a traditional letter-based as well as visual concept-based interface. Finally, we evaluate the performance and usability of the developed speller using empirical (accuracy, information transfer speed, input speed) metrics.

**Keywords:** Physiologic computing, NCI, EMG, speller, user interface.

# Desarrollo de un deletreador basado en conceptos basados en EMG

## Resumen

La computación fisiológica es un paradigma de la computación que usa los datos de los usuarios como entradas durante las tareas computacionales en un Ambiente de vida cotidiana soportado por computadores (AAL). Monitoreando, analizando y respondiendo a dichas entradas, los Sistemas de Computación Fisiológica pueden responder al estado cognitivo, emocional y físico de los usuarios. Un caso particular es el de la interfaz de Computación Neuronal (NCI), que usa señales eléctricas para manejar la actividad muscular del usuario estableciendo una comunicación directa entre el usuario y el computador. Se presenta una taxonomía de parámetros de aplicación de deletreo, proponiendo un modelo de PCS y describiendo el desarrollo de un deletreador basado en EMG. Se analiza y desarrolla una aplicación con un sistema basado en letras tradicionales y una interfaz visual. Finalmente, se evalúa el desempeño y usabilidad del sistema desarrollado.

**Keywords:** Computación fisiológica, NCI, EMG, deletreador, interfaz de usuario.

## 1. Introduction

Today's computer systems are failing to satisfy the increasing expectations of everyday users. While computer systems output features multimedia communication channels, computer input is still fairly limited to mechanical (keyboard, mouse), audio (speech) and tactile inputs [1]. Such limitations raise barriers for people with major or minor disabilities such as elderly people with motor impairments. Considering the predicted demographic changes in society and the need to improve the quality of daily life for humans during different periods of their life, new concepts and

methods of human-computer interaction (such as Ambient Assisted Living (AAL) [2] systems) must be researched. These efficiently address the accessibility problems in human interaction with software applications and services while meeting the individual requirements of the users in general, including disabled and elderly people.

Physiological computing is a paradigm of computing that treats user's physiological data as input during computing tasks [3]. By monitoring, analyzing and responding to such inputs, physiological computing systems (PCS) are able to monitor and respond to users' cognitive, emotional and physical states in real time. Examples of such physiological

data are Electroencephalography (EEG), Electrooculography (EOG), Electromyography (EMG), etc. A user's state is captured using sensors attached to the body, and they could be used to offer assistance if the user is frustrated or unable to perform the task due to excessive mental workload, to adapt the level of challenge in order to sustain or increase engagement, or to incorporate an emotional display element into the user interface [4].

Specific examples of PCS are the neural computer interface (NCI) and the brain computer interface (BCI). BCI manipulates users' brain activity (EEG) to establish a direct pathway between the brain and computer. The concept is particularly suited to the needs of the handicapped as well to smart environments. NCI is similar to BCI in methods it uses as well as its applications; however, it uses the surface EMG signals to establish an interface between human peripheral neural system and computers by recording electrical signals governing a subject's muscular movements.

A speller is a typical example of a PCS, which is a benchmark application for BCI and NCI methods [5]. The speller aims to help persons unable to activate muscles traditionally used in communication (for example in the hands and tongue) to spell words by utilizing their neural activity. Usually, spellers use signal amplitude information; however, integrating this with signal preprocessing methods such as noise reduction methods (e.g., shrinking functions [6], nonlinear filter operators [7]), and user intent prediction techniques can improve the results [8]. Due to the noise present in the physiological signals, the detection of control signals requires the use of efficient digital signal processing techniques [9-11]. Furthermore, the requirements of real-time systems prohibit the use of highly complex computations and demand that the result is delivered just in time for the user to be able to use it [12].

In this paper, we continue our previous work [13,14] and describe a PCS model for EMG-based applications, analyze the requirements for the development of interfaces for impaired users and visual interfaces of known speller applications, and describe the development of an EMG speller as a typical benchmark application.

## 2. Analysis of requirements for speller applications

The requirements for speller applications can be categorized as being on different levels depending upon the physical abilities of their users [15]: 1) Users with no physical disability, who may use NCI for entertainment or in other situations where physical movement is restricted. 2) Users with minor impairments (such as older persons). 3) Users with severe physical disabilities, who may wish to use NCI as a secondary input. 4) Users who have limited muscle control and may need to use NCI as a method for communication.

First, the speller must follow general requirements for smart systems to be integrated into the AAL environments. Next, the specific requirements for impaired users must be followed. Impaired users need assistance such as automatic learning of user's behavior to estimate his/her current needs. Humans often make mistakes in interacting with machines, so any human-operated system user interface should be

designed such that errors are prevented whenever possible: the deactivation of invalid commands; making errors easy to detect and showing users what they have done; and easily allowing undoes, reverse, correct errors [16]. For smart systems, the following principles (also called "operational modes") of Humanistic Intelligence Framework [17] must be satisfied:

1) **Constancy**: the interface should operate continuously to read signals from human to computer and to provide a constant user-interface.

2) **Augmentation**: the primary task is increasing the intelligence of the system rather than computing tasks.

3) **Mediation**: the interface mediates between human senses, emotions and perceptions and acts as an information filter by blocking or attenuating undesired input in order to decrease negative effects of interaction (such as fatigue, information overload, etc.) and to increase positive effects (such as user satisfaction) by amplifying or enhancing desired inputs.

According to Lopes [18], user interface for persons with disabilities must: support user variability, providing the means to adapt to user-specific requirements, support a wide range of input devices and output modes, provide minimal user interface design, promote interaction and retain user attention on the tasks, and establish strong feedback mechanisms that may provide reward schemes for correct behavior (results). The requirements for interfaces for impaired users can be formulated as follows [2]: 1) Limited access to details: complex and vital details of the system have to be hidden to avoid overwhelming and trapping users. 2) Self-learning: detected common patterns in the behavior of the user should be used to automatically create rules or shortcuts that speed and ease up the use of the system. 3) System interruption: Impaired users have, in most cases, no idea how the system works; therefore, easy cancellation of system's activities must be ensured.

## 3. Overview of speller systems and interfaces

The research into developing and improving speller systems focuses on improving spelling accuracy, increasing speed of information transfer, developing usable and effective speller interfaces, and combining EEG/EMG based input with input automation techniques such as word complete and automatic correction of misspellings.

The speller implementations can be characterized by:

**Type of data**: EEG [19], EMG [20], ECoG [8], EOG [21].

**Type of analyzed signal**: P300 event-related potentials (ERPs), which are a series of peaks and troughs appearing in the EEG in response to the occurrence of a discrete event such as presentation of a stimulus or psychological reaction to a stimulus [8], Error-related Potentials (ErrPs) generated by the subject's perception of an error [22], steady-state visual evoked potential (SSVEP), which are signals that are natural responses to visual stimulation at the same (or multiples of) frequency as the visual stimulus [23].

**Modality**: *Auditory*: the rows and columns of the letter matrix are represented by different sounds such as spoken numbers [24] or environmental sounds. *Visual*: subjects

direct their eye gaze toward the letter they want to select. There are two cases: overt attention when eye gaze is directed toward the target letter, and covert attention when eye gaze is directed at a central fixation point [25].

#### Interface:

**Single character (or Linear) speller:** all letters are shown and each letter is flashed individually until letter selection is done [26].

**Matrix Speller:** All letters are arranged in a matrix. First, speller flashes an entire column or row of characters. Then, single letters are flashed in a sequence, and can be selected [27]. Different matrix sizes can be used, e.g., a 6x6 matrix containing all 26 letters of the alphabet and 10 digits (0-9), or even a full QWERTY keyboard [23].

**Lateral single-character** is a single-character paradigm comprising of all letters in the alphabet and it follows an event strategy that significantly reduces the time for symbol selection [28].

**Checkerboard Speller** [29]: the 8x9 matrix is virtually superimposed on a checkerboard, which the participants never actually see. The items in white cells of the 8 x 9 matrix are segregated into a white 6 x 6 matrix and the items in the black cells are segregated into a black 6 x 6 matrix. The items in the first matrix randomly populate the white or black matrices, and the users see random groups of six items flashing (as opposed to rows and columns in Matrix Speller). Such layout controls for adjacency-distraction errors, as the adjacent items cannot be included in the same flash group.

**Hex-o-Spell:** speller consists of six circles that all have the same distance to the point of fixation. The circles are flashed while users direct their attention to one of the circles. First, the circle with the desired group of letters is selected. Second, letters are redistributed over the circles and the target letter is selected [30].

**Frequency-based layout** accounts for the relative frequency of character occurrence in a language [31]. It has a virtual keyboard with 32 symbols surrounded by five boxes flickering at different frequencies. These boxes correspond to commands to navigate the cursor, and to select the intended character. The application starts with the cursor in the central position corresponding to the most frequent character in English (i.e., "E"). Letters with the higher frequency of occurrence are positioned closer to the center while the less frequent ones are further away. The user can navigate the cursor to the desired letter and confirm his/her choice with the "Select" command. The further the character is located from the center, the more command selections (cursor movements) are required.

**Stimulus type:** the way each individual character changes (e.g., flashing, color change, etc.). Rapid serial

visual presentation (RSVP) is a method of displaying information (generally text or images) in which the text is displayed word-by-word in a fixed focal position [32].

**Stimulus rate:** the speed at which individual characters change.

**Stimulus pattern:** grouping of symbols in the interface (e.g., QUERTY or DVORAK layouts on a virtual keyboard).

**Character set (alphabet):** includes all letters of the alphabet as well as some additional symbols (numbers, separation marks, etc.).

**Intelligence techniques:** additional techniques for improving the system's accuracy and rate of communication such as using the language model [33], word autocomplete, spelling correction or word prediction.

The result of the analysis can be considered as a taxonomy of speller application parameters, which could be used for developing new speller applications. Next, we discuss the PCS model and its application in developing the EMG-based systems.

#### 4. A physiological computing system model

The physiological computing system (PCS) model proposed in this paper is based on the "operational modes" of the Humanistic Intelligence Framework [17]:

1) **Constancy:** PCS should operate continuously to read signals from humans and provide a constant user interface.

2) **Augmentation:** the primary task is increasing the intelligence of the system rather than computing tasks.

3) **Mediation:** PCS mediates between human senses, emotions and perceptions and acts as an information filter by blocking or attenuating undesired inputs to decrease negative effects of interaction (fatigue, information overload) as well as to increase positive effects (e.g., user satisfaction) by amplifying or enhancing desired inputs.

The proposed model is summarized in Fig. 1 and has three levels of information processing.

1) On the *lowest* level, the physiological signal is sampled into a data stream of physiological data. Downsampling can be used to decrease the amount of data and increase information processing speed at higher levels.

2) On the *intermediate* level, data is aggregated and events corresponding to specific patterns of data are generated. Machine learning techniques such as artificial neural networks may be used to recognize such events and generate decisions.

3) On the *highest* level, decisions are processed and used to generate control commands for external systems.

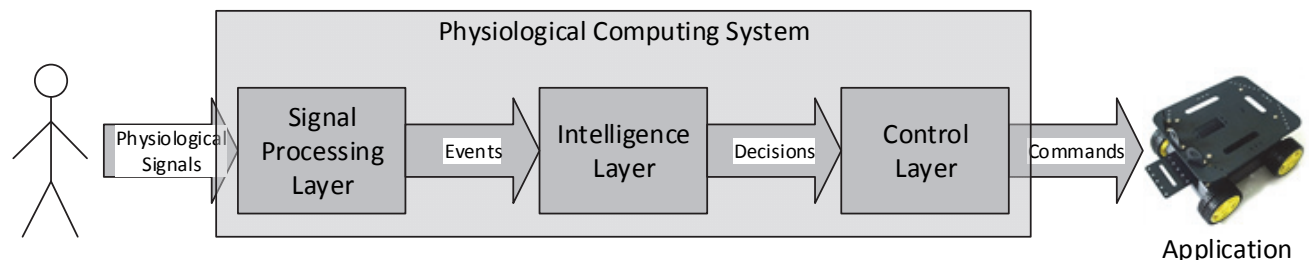


Figure 1. Physiological computing system model.  
Source: The authors

## 5. Development of EMG speller

### 5.1. Components and architecture

A NCI system is generally comprised of the following components: (1) a device that records muscular activity signals; (2) a signal preprocessor that reduces noise and artifacts; (3) a decoder that classifies the de-noised signal into control commands for (4) an external device or application (e.g., a robotic actuator, a computer program etc.), which provides feedback to the user [34].

Our speller application has three layers: 1) on the lowest layer, the physiological signal is sampled into a data stream of physiological data. Downsampling can be used to decrease the amount of data and increase information processing speed at higher levels. 2) On the intermediate layer, data is aggregated and events corresponding to specific patterns of data are generated. Machine learning techniques such as artificial neural networks may be used to recognize such events and generate decisions. 3) On the highest layer, decisions are processed and used to generate control commands for external applications (systems).

The speller's architecture consists of 6 main components: *MainReader* – the system module responsible for control of data reader, which is selected to use. *ReaderAPI* – public external interface module. All third-party modules must implement this component for full system integration. *MainController*– system module responsible for selected control module (executes commands). *NiaReader*– third-party module implemented for the “OCZ NIA” data reader device. *SpellingSquare*– third-party module implemented for text input in the symbol matrix using EMG-based commands. The dashed rectangle separates system components (inside the dashed rectangle) from external components, which are either the sensor controllers (EMG readers) or actuator controllers (software or hardware applications such as robots). The speller system is based on *JavaNetBeans*

framework. The speller was developed with its future extension and maintenance in consideration so that external components are easy to add or remove.

### 5.2. Control

The speller has two types of control commands: “Select” command – selects a column or types a symbol of that column. “Cancel” command – exits the selected column or deletes the selected symbol. These control commands can be initiated by the movements of facial muscles. In practice, blinks of the eye are used to generate each control command (left eye blink for “select” and right eye blink for “cancel”). The user can see the EMG signal feedback in EMG signal view area (see Fig. 2).

The particular control command is performed when the amplitude of the EMG signal is higher than the specified threshold value. The thresholds are marked as yellow horizontal lines in the EMG signal view area. The upper threshold indicates the “select” command, and the lower threshold indicates the “cancel” command. Threshold values can be adjusted using threshold setting sliders. The signal view of EMG, when spelling the word “hello”, is presented in Fig. 2. In Fig. 2 (left), the word “hello” is spelled without mistakes. In Fig. 2 (right), the spelling contains a few mistakes. In order to correct these mistakes cancellation commands must be performed. The spikes indicate the “select” command. One trial (selection of one character) contains two positive signal spikes, the first spike is for column selection, the second for letter selection in the corresponding column.

### 5.3. Traditional speller interface

The developed EMG speller has two different user interfaces. One is a traditional matrix-based speller interface

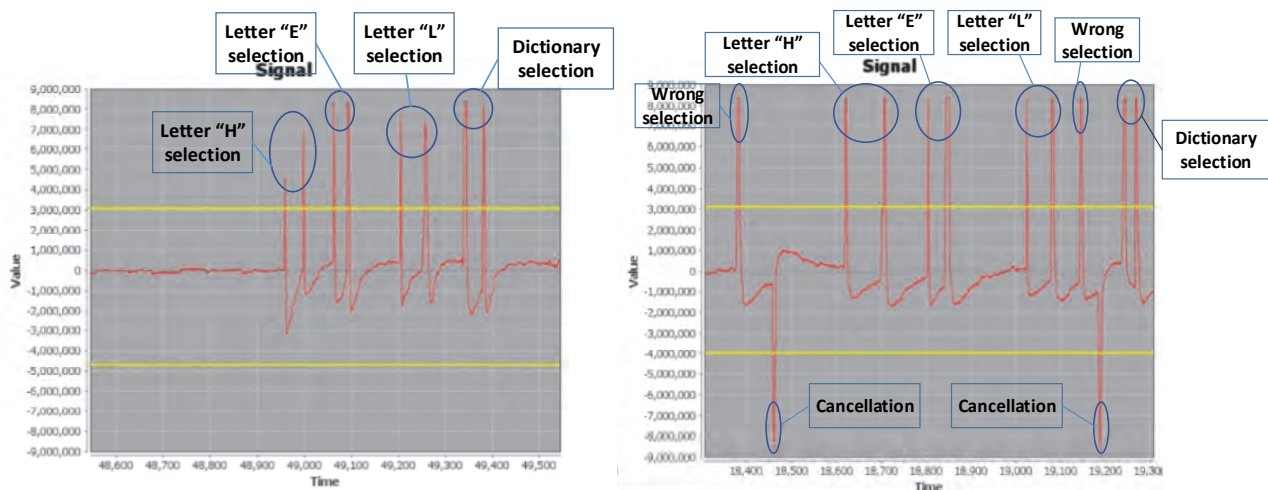


Figure 2. Signal view of spelling the word “hello”. Left: no spelling mistakes were made while three characters (“hel”) were selected from symbol matrix. Right: two spelling mistakes were made, and after each wrong selection the cancellation command was performed. In both cases, dictionary selection was used to complete the word.

Source: The authors.

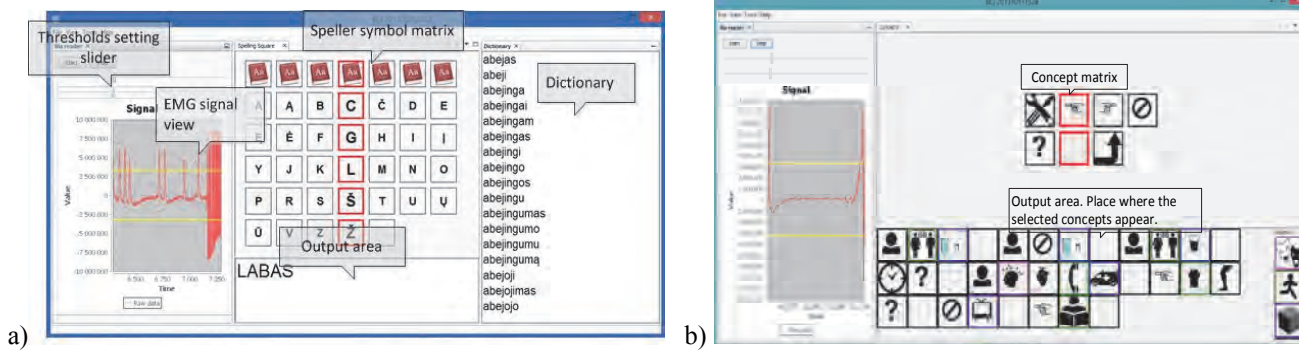


Figure 3. EMG speller Interfaces: a) traditional, and b) visual concept based. Source: The authors.

that is presented in Fig. 3a. The other one is a novel concept-based interface that is presented in Fig. 3b. The most important part of the visual interface is symbol matrix. The matrix is adaptable so that various symbols (including special or national) could be added into the matrix. The red-colored column indicates the current position of the speller cursor. The cursor moves coherently from column to column until the user activates the “select” command. Next, the cursor moves onto each symbol in the specific column. After another “select” command, the particular symbol is selected. That symbol appears in the output area (see Fig. 3). The speller cursor moves by step, which varies from 500 to 1500

#### 5.4. Visual concept-based speller interface

We have also implemented a completely different EMG speller interface. Traditional spellers use common letters in the alphabet rearranged in different layouts. We have implemented a visual concept based interface that is based on graphical symbols (graphemes) of a visual communication language. Visual language is a form of communication that uses visual elements as opposed to a formal written (textual) language to convey meaning or an idea. Visual language uses pictograms or ideograms to symbolize the concepts that are to be communicated. Pictograms are pictures that resemble what they signify, and represent a concept, object, activity, place or event by graphical illustration. An ideogram is a graphical symbol that represents an idea, rather than a group of letters arranged according to the phonemes and grammar of a spoken language, as is the case in textual languages.

Visual symbols form part of our daily lives through their use in medication, transport, computers, etc., because they indicate in a concise and easily understandable form places, directions, actions or action constraints in either the real world or virtual space. Thus, visual symbols can be used in a number of situations in which textual messages are not possible or adequate due to context or user based constraints. The development of software for people with impaired cognitive or motor capabilities requires the developers to take into account the high-level cognitive processes and mental models of the solution to a domain-specific problem (such as expressing basic needs of an impaired user), which may contribute to the ease of use of the developed application by its potential users.

While textual (letter-based) languages are good for

milliseconds. The step value depends on the number of mistakes the user makes. A smaller number of mistakes mean the cursor movement will move at a faster speed. The mistake is considered to be the “cancel” command.

The first row of the speller symbol matrix contains a dictionary selection. This selection allows the user to enter the dictionary. When a few symbols or word stem is written, the dictionary provides the user with the opportunity to complete the particular word faster. The system logs dictionary selections, thus commonly used words are at the top of the dictionary and the dictionary adapts to the user.

expressing all kinds of human communication, they require a great deal of typing effort for human-computer communication, which for specific groups of users such as users with impaired motor capabilities may be a tiresome burden. A visual concept-based language allows high-level concepts to be expressed succinctly using a notation tailored to a set of specific user problems. Such languages could be tailored towards a specific domain, and could be based only on the relevant concepts and features of that domain. Therefore, visual languages can be considered as a medium of communication that allows for the gap to be bridged between the mental models of users and the domain systems and, consequently, to cut the distance (both in terms of effort required and speed of communication) between communicating parties in AAL applications.

A snapshot of the visual concept-based interface that was developed for the EMG speller is shown in Fig. 3b. The interface is organized using a hierarchical structure. It consists of symbol matrixes connected with each other by references. Each reference is represented as an icon of a particular domain. Currently, we have included visual symbols from 8 main concept domains: emotion domain, location domain, action domain, time domain, object domain, body part domain, person domain and special symbol domain. Most of the visual icons we use are adopted from The Noun Project (<http://thenounproject.com/>), while the remaining ones are custom-built. Each domain matrix as well as the root matrix can be extended easily by adding new icons (concepts) to the particular domain matrixes. Also each icon (concept) can contain a reference to the specific subdomain matrix. The taxonomical tree of concept matrixes is summarized in Fig. 4.

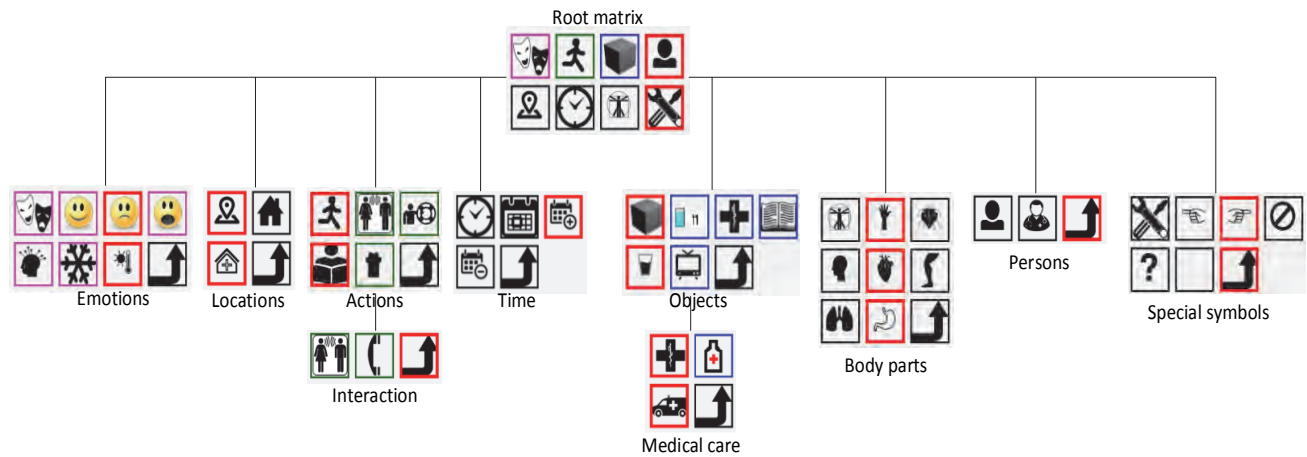


Figure 4. The tree of concept matrixes.  
Source: The authors.

The meaning of visual concepts is presented in Table 1.

Table 1.  
Meaning of visual symbols.  
Source: The authors.

|  |                                                    |
|--|----------------------------------------------------|
|  | Return sign brings back cursor to the root matrix. |
|  | Emotions/feelings:                                 |
|  | Happy                                              |
|  | Sad                                                |
|  | Amazed                                             |
|  | Pain                                               |
|  | Cold                                               |
|  | Hot/warm                                           |
|  | Location (current location):                       |
|  | Hospital                                           |
|  | Home/house                                         |
|  | Actions:                                           |
|  | To read a book                                     |
|  | To interact:                                       |
|  | To call                                            |
|  | To scratch                                         |
|  | To help                                            |
|  | Time:                                              |
|  | Past                                               |
|  | Today                                              |
|  | Future                                             |
|  | Objects:                                           |
|  | Drink                                              |
|  | Meal                                               |
|  | TV                                                 |

|  |                                    |
|--|------------------------------------|
|  | Medical care:                      |
|  | Ambulance                          |
|  | Medicine                           |
|  | Book                               |
|  | Body parts:                        |
|  | Head                               |
|  | Hand                               |
|  | Heart                              |
|  | Stomach                            |
|  | Back                               |
|  | Leg                                |
|  | Person (Me):                       |
|  | Medic/doctor                       |
|  | Special symbols:                   |
|  | Question sign                      |
|  | Left pointer to object or subject  |
|  | Right pointer to object or subject |
|  | "Not" sign                         |

## 6. Experimental results

### 6.1. Experiment with text-based interface

The experiments we performed with 5 subjects (3 males), aged 24–54 (mean = 33) years. Subjects did not have any neurological abnormalities, reported normal or corrected to normal vision, and did not use medication. All subjects gave informed consent prior to the experiment.

The EMG data was recorded using OCZ Neuro Impulse

Actuator equipment. Visual stimuli were presented on a 13.3" size TFT LCD screen with  $1360 \times 768$  pixel resolution and a refresh rate of 60 Hz. Subjects were seated in front of a table. The screen was in the middle of the table at a distance of approximately 100 cm from the subject. The size of each character was  $1.5 \times 1.5$  cm ( $0.86 \times 0.86^\circ$  visual angle) and the entire speller matrix was  $9.5 \times 13$  cm ( $5.44 \times 7.42^\circ$  visual angle).

Stimuli consisted of intensifications of the rows and columns in sequential order. Intensification was achieved by increasing the size of all characters in the row or column with a factor 500 for 1500 ms.

A trial is defined here as spelling of one character. All trials started with the speller being displayed on the screen, together with an instruction indicating which letter to select. Each stimulation sequence was followed by feedback on the screen, showing which letter or group of letters had been selected.

Three text paragraphs were given to the experiment participants. Their task was to input the proposed text paragraphs using speller. All text paragraphs were presented in the Lithuanian language. The first text paragraph contained 126 characters and its content was that of a daily conversation. The second text paragraph contained 111 characters and its content was that of a scientific speech. The third text paragraph contained 120 characters and was that of a scientific speech with mathematical equations. Each experiment participant repeated the experiment 4 times. The average accuracy, input speed and bit rate values were calculated.

Quantitatively, the performance of speller application can be evaluated using accuracy, information transfer speed and input speed metrics. Accuracy is calculated as the percentage of correct decisions during the symbol selection process. Bit rate (or information transfer rate) indicates how much information can be communicated per time unit (calculated using the Wolpaw's formula [35]). Finally, input speed is measured as the average time required to enter a set of benchmark texts.

The experimental results are presented in Table 2 and in Figs. 5, 6 & 7. Our results are comparable with the results achieved by other authors.

Accuracy values of the BCI/NCI spellers achieved by other authors (Table 2) are within a range of 80-95% (82.77% using ECoG [8], 87.58% using SSVEP-based BCI [24], 87.8% for EOG-based speller [21], 91.80% [36], 94.8% for RVSP based speller [32]).

The information transfer rate (aka bit rate) of the BCI/NCI-based speller applications achieved by other authors is within 7-41 bits/min (7.43 bits/min [37], 17.13 bits/min [38], 19.18 bits/min [36], 11.58-37.57 bits/min [39], 40.72 using SSVEP based BCI [23], 41.02 using ECoG[8]).

The symbol input speed of the BCI/NCI-based speller applications achieved by other authors is within 1-12 CPM (1.43 CPM for RSVP based speller [32], 4.33 CPM [36], 4.91 CPM [39], 9.39 CPM using SSVEP based BCI [23], 12.75 CPM [40]).

Table 2.

Evaluation of the speller application. Source: The authors' own.

| Quantitative metric                         | Average Value | Peak value |
|---------------------------------------------|---------------|------------|
| BASIC SETTINGS                              |               |            |
| Accuracy                                    | 96.29         | 98.25      |
| Information transfer rate                   | 34.78         | 41.83      |
| Input speed                                 | 6.37          | 7.57       |
| ADAPTABLE STIMULUS RATE                     |               |            |
| Accuracy                                    | 88.61         | 93.64      |
| Information transfer rate                   | 42.53         | 49.79      |
| Input speed                                 | 8.19          | 9.60       |
| WITH DICTIONARY                             |               |            |
| Accuracy                                    | 92.65         | 96.06      |
| Information transfer rate                   | 43.55         | 49.26      |
| Input speed                                 | 8.22          | 9.35       |
| WITH ADAPTABLE STIMULUS RATE AND DICTIONARY |               |            |
| Accuracy                                    | 89.16         | 92.53      |
| Information transfer rate                   | 58.69         | 65.53      |
| Input speed                                 | 11.35         | 12.42      |

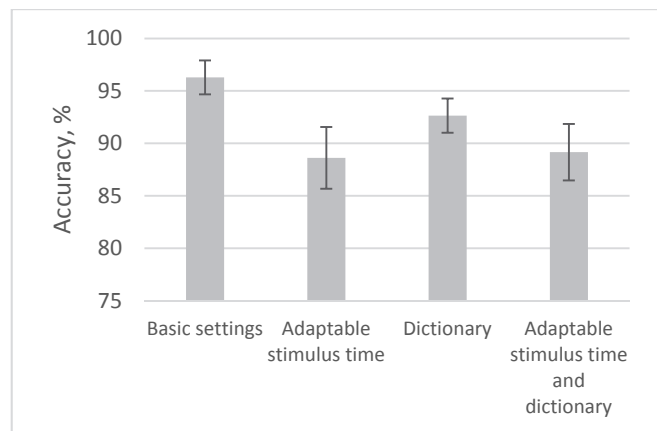


Figure 5. Accuracy of character input.

Source: The authors.

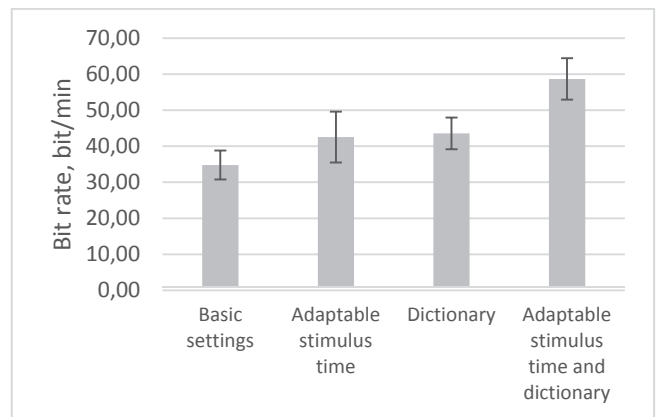


Figure 6. Information transfer rate.

Source: The authors.

## 6.2. Experiment with visual concept based interface

The experiment with the visual concept-based interface was performed under the same conditions as the experiment with text-based interface. The participants had to enter one

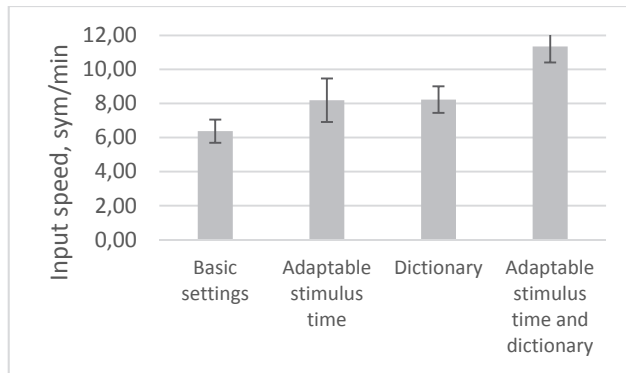


Figure 7. Input speed.  
Source: The authors.

paragraph of text (196 symbols) that was based on daily conversation topics. This paragraph contained simple formulations of basic user needs (see an example of message in Fig. 8). The experiment was performed with 2 subjects (both male, aged between 24-28 years). The duration of the experiment was measured, and the input speed is presented in Fig. 9.

Two metrics of input speed are presented in Fig. 10: concept input speed (number of valid concepts entered in a time unit) and input speed of letters in a textual language, which require to be entered in a time unit in order to convey the same message. The results show that using the visual concept-based interface can increase input speed to 26.03 sym/min (equivalent to 4.31 concepts/min) in comparison to 11.35 sym/min (see Table 2) using the EMG speller's traditional text-based interface.



**I don't want to eat**

Figure 8. Example of a message entered using the visual language.  
Source: The authors.

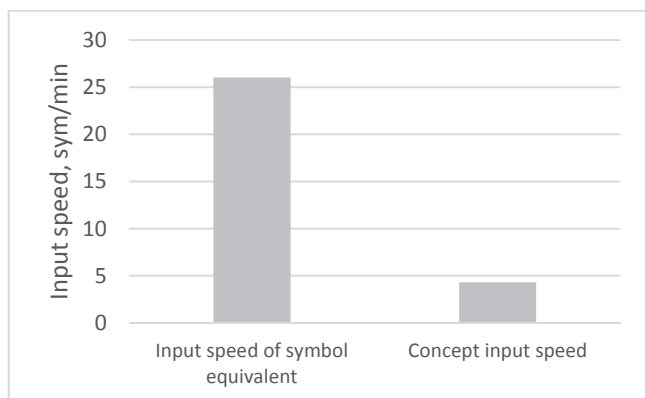


Figure 9. Input speed of concept-based speller.  
Source: The authors.

## 7. Evaluation and conclusion

We have described the development of the EMG speller application for an Assisted Living Environment based on a three-layered model of a Physiological Computing system based on the “operational modes” of Mann’s Humanistic Intelligence Framework. This system is controlled by voluntary muscular movements, particularly the orbicular ones (i.e., eye blinking), which are translated into text input commands.

The developed speller application is adaptive (input speed can be adapted dynamically in response to the user’s state) and intelligence (it uses word complete and word frequency features). The application can aid people with reduced mobility by increasing their autonomy in their home environment.

Two types of interfaces were developed and evaluated: the traditional letter matrix-based interface and the novel visual concept-based interface. The speller’s letter-matrix interface has been evaluated using accuracy, bit rate and input speed metrics. The empirical results obtained are within range of results also obtained by other authors. The visual concept-based interface was evaluated using concept input speed and compared with equivalent text input speed. The results show an improvement in input speed by a factor of 2.3 in comparison to the best results achieved using a letter matrix based interface with a dictionary and adaptable input speed, which could be explained by the conciseness of the visual language (both in terms of the size of dictionary and the length of visual “words”) as well as by a reduced user effort required to communicate a message.

The advantages of using a visual language rather than a textual (alphabet-based) one are as follows: visual representation is easier to understand and communicate, common visual signs (such as computer icons) are universally known and understood, there is no need to implement multiple languages as the signs of a visual language are understandable for all users, there are fewer grammar constraints, there is immediate visual feedback, a smaller effort due to economy of concepts is required for communication, input speed is increased as the user has to select only one visual symbol (icon) instead of having to enter many the different letters in a word.

The disadvantages of the visual language are: ambiguity in interpreting sentences consisting of visual symbols and limited expression capabilities.

We plan to address these problems in future the by extending the dictionary of visual symbols as well as by integrating an automatic translation plugin for conversion between the entered sequence of visual symbols and its textual counterpart.

## Acknowledgements

The work described in this paper has been carried out within the framework the Operational Programme for the Lithuanian Development of Human Resources 2007-2013 in the “Strengthening the capacities of researchers and scientists” project VP1-3.1-ŠMM-08-K-01-018 and the “Research and development of Internet technologies and

their infrastructure for smart environments of things and services” (2012-2015) project, which were funded by European Social Fund (ESF). The authors also would like to acknowledge the contribution of the COST Action IC1303 – Architectures, Algorithms and Platforms for Enhanced Living Environments (AAPELE).

## References

- [1] Schroeder, A. and Wirsing, M. Developing physiological computing systems: Challenges and Solutions. *Proc. of Software Engineering Conference, LNI 198, GI 2012*, pp. 21-36, 2012.
- [2] Marinc, A., Stocklów, C., Braun, A., Limberger, C., Hofmann, C. and Kuijper, A., Interactive personalization of ambient assisted living environments, In: *Human interface and the Management of Information – vol. 6771, LNCS Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg*, pp. 567-576, 2011. DOI: 10.1007/978-3-642-21793-7\_64
- [3] Allanson, J. and Fairclough, S.H., A research agenda for physiological computing. *Interacting with Computers*, 16 (5), pp. 857-878, 2004. DOI: 10.1016/j.intcom.2004.08.001
- [4] Fairclough, S.F., Fundamentals of physiological computing. *Interacting with Computers*, 21 (1-2), pp. 133-145, 2009. DOI: 10.1016/j.intcom.2008.10.011
- [5] Cecotti, H., Spelling with non-invasive Brain-Computer Interfaces – Current and future trends. *J. of Physiology-Paris*, 105 (1-3), pp. 106-114, 2011. DOI: 10.1016/j.jphysparis.2011.08.003
- [6] Martisius, I. and Damaševičius, R., Class-adaptive denoising for EEG data classification, In: *Proc. of 11th Int. Conference on Artificial Intelligence and Soft Computing, ICAISC - vol. 7268, LNCS, Springer, Zakopane, Poland*, pp. 302-309, 2012. DOI: 10.1007/978-3-642-29350-4\_36
- [7] Martisius, I., Damaševičius, R., Jusas, V. and Birvinskas D., Using higher order nonlinear operators for SVM classification of EEG data. *Electronics and Electrical Engineering*, 3 (119), pp. 99-102, 2012. DOI: 10.5755/j01.eee.119.3.1373
- [8] Speier, W., Fried, I. and Pouratian, N., Improved P300 speller performance using electrocorticography, spectral features, and natural language processing. *Clin. Neuroph.* 124 (7), pp.1321-1328, 2013. DOI: 10.1016/j.clinph.2013.02.002
- [9] Birvinskas, D., Jusas, V., Martisius, I. and Damaševičius R., Data compression of EEG signals for artificial neural network classification. *Information Technology and Control*, 42 (3), pp. 238-241, 2013. DOI: 10.5755/j01.itc.42.3.1986
- [10] Martisius, I., Birvinskas, D., Damaševičius, R., and Jusas V., EEG Dataset reduction and classification using wave atom transform, *Proc. of 23rd International Conference on Artificial Neural Networks (ICANN2013), Sofia, Bulgaria*, pp. 208-215, 2013. DOI: 10.1007/978-3-642-40728-4\_26
- [11] Birvinskas, D., Jusas, V., Martisius, I. and Damaševičius R., EEG Dataset reduction and feature extraction using discrete cosine transform, *Proc. of UK 6th European Modelling Symposium on Mathematical Modelling and Computer Simulation (EMS2012)*, pp. 199-204, 2012. DOI: 10.1109/ems.2012.88
- [12] Martišius, I., Šidlauskas, K. and Damaševičius, R., Real-time training of voted perceptron for classification of EEG data. *International Journal of Artificial Intelligence (IJAI)*, 10 (S13), pp. 41-50, 2013.
- [13] Vasiljevas, M., Turčin, R. and Damaševičius R., EMG Speller with adaptive stimulus rate and dictionary support, *Proc. of FeDCSIS'2014: Federated Conference on Computer Science and Information Systems, Warsaw, Poland*, pp. 233-240, 2014. DOI: 10.15439/2014f338
- [14] Vasiljevas, M., Turčin, R. and Damaševičius, R., Development of EMG-based speller, *Proc. of TERRACCION 2014: XV International Conference on Human Computer Interaction*, 2014. DOI: 10.1145/2662253.2662260
- [15] Quek, M., Höhne, J., Murray-Smith, R. and Tangermann, M., Designing future BCIs: Beyond the bit rate, in: Allison, B., Dunne, S., Leeb, R., Millan, J.D.R. and Nijholt, A. (Eds.), *Towards Practical Brain-Computer Interfaces: Bridging the Gap from Research to Real-world Applications*, Springer, pp. 173-196, 2013.
- [16] Johnson, J., *Designing with the mind in mind: A simple guide to understanding user interface design rules*. Morgan Kaufmann, Burlington, 2011.
- [17] Mann, S., *Wearable computing: Toward humanistic intelligence*. *IEEE Intelligent Systems*, 16 (3), pp. 10-15, 2001. DOI: 10.1109/5254.940020
- [18] Lopes, J.B., *Designing user interfaces for severely handicapped persons*, *Proc. of the 2001 EC/NSF Workshop on Universal accessibility of ubiquitous computing: providing for the elderly (WUAUC'01)*, ACM, New York, NY, USA, pp. 100-106, 2001. DOI: 10.1145/564526.564553
- [19] Tomioka, R. and Müller, K.-R., A regularized discriminative framework for EEG analysis with application to brain-computer interface. *NeuroImage*, 49 (1), pp. 415-432, 2010. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2009.07.045
- [20] Lalitharatne, T.D., Teramoto, K., Hayashi, Y. and Kiguchi, K., Towards hybrid EEG-EMG-based control approaches to be used in bio-robotics applications: Current status, challenges and future directions. *Journal of Behavioral Robotics*, 4 (2), pp. 147-154, 2013. DOI: 10.2478/pjbr-2013-0009
- [21] Liu, Y., Zhou, Z., and Hu, D., Gaze independent brain-computer speller with covert visual search tasks. *Clinical Neurophysiology*, 122 (6), pp. 1127-36, 2011. DOI: 10.1016/j.clinph.2010.10.049
- [22] Combaz, A., Chumerin, N., Manyakov, N.V., Robben, A., Suykens, J.A.K. and Van Hulle, M.M., Towards the detection of error-related potentials and its integration in the context of a P300 speller brain-computer interface. *Neurocomputing*, 80, pp. 73-82, 2012. DOI: 10.1016/j.neucom.2011.09.013
- [23] Hwang, H.-J., Lim, J.-H., Jung, Y.-J., Choi, H., Lee, S.W. and Im, C.H. Development of an SSVEP-based BCI spelling system adopting a QWERTY-style LED keyboard. *Journal of Neuroscience Methods*, 208 (1), pp. 59-65, 2012. DOI: 10.1016/j.jneumeth.2012.04.011
- [24] Furdea, A., Halder, S., Krusienski, D.J., Bross, D., Nijboer, F., Birbaumer, N., Kübler, A., An auditory oddball (P300) spelling system for brain-computer interfaces. *Psychophysiology*, 46, pp. 617-25, 2009. DOI: 10.1111/j.1469-8986.2008.00783.x
- [25] Brunner, P. and Schalk, G., Toward a gaze-independent matrix speller brain-computer interface. *Clinical Neurophysiology*, 122 (6), pp. 1063-1064, 2011. DOI: 10.1016/j.clinph.2010.11.014
- [26] Ortner, R., Prueckl, R., Putz, V., Scharinger, J., Bruckner, M., Schnuerer, A. and Guger, C., Accuracy of a P300 speller for different conditions: A comparison. *Proc. of the 5th Int. Brain-Computer Interface Conference, Graz, Austria*, 2011, 196 P.
- [27] Farwell, L.A. and Donchin, E., Talking off the top of your head: Toward a mental prosthesis utilizing event-related brain potentials. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, 70 (6), pp. 510-523, 1988. DOI: 10.1016/0013-4694(88)90149-6
- [28] Akram, F., Han, H.-S., Jeon, H.J., Park, K., Park, S.-H., Cho, J. and Kim, T.-S., An efficient words typing P300-BCI system using a modified T9 interface and random forest classifier, *Proc. of 35th Ann. Int. Conf. of the IEEE EMBS*, pp. 2251-2254, 2013. DOI: 10.1109/embs.2013.6609985
- [29] Townsend, G., LaPallo, B.K., Boulay, C.B., Krusienski, D.J., Frye, G.E., Hauser, C.K., Schwartz, N.E., Vaughan, T.M., Wolpaw, J. R. and Sellers, E.W., A novel p300-based brain-computer interface stimulus presentation paradigm: moving beyond rows and columns. *Clinical Neurophysiology*, 121 (7), pp. 1109-1120, 2010. DOI: 10.1016/j.clinph.2010.01.030
- [30] Treder, M. and Blankertz, B., Covert attention and visual speller design in an ERP-based brain-computer interface. *Behavioral and Brain Functions*, 6, pp. 1-13, 2010. DOI: 10.1186/1744-9081-6-28
- [31] Volosyak, I., Cecotti, H., Valbuena, D. and Gräser, A., Evaluation of the Bremen SSVEP based BCI in real world conditions, *Proc. of the 11th Int. Conference on Rehabilitation Robotics, Kyoto, Japan*, pp. 322-331, 2009. DOI: 10.1109/icorr.2009.5209543
- [32] Aqualagna, L. and Blankertz, B., Gaze-independent BCI-spelling using rapid serial visual presentation (RSVP). *Clinical Neurophysiology*, 124 (5), pp. 901-908, 2013. DOI: 10.1016/j.clinph.2012.12.050
- [33] Ulas, C. and Cetin, M., Incorporation of a language model into a brain computer interface based speller through HMMs, *Proc. of Int. Conf.*

- on Acoustics, Speech and Signal Processing, pp. 1138-1142, 2013. DOI: 10.1109/icassp.2013.6637828
- [34] Mora-Cortes, A., Manyakov, N.V., Chumerin, N. and Van Hulle, M.M., Language model applications to spelling with brain-computer interfaces. *Sensors* 14, pp. 5967-5993, 2014. DOI: 10.3390/s140405967
- [35] Wolpaw, J.R., Birbaumer, N., Heetderks, W.J., McFarland, D.J., Peckham, P.H., Schalk, G., Donchin, E., Quatrano, L.A., Robinson, C.J. and Vaughan T.M., Brain-computer interface technology: A review of the first international meeting. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, 8, pp. 164-173, 2000. DOI: 10.1109/TRE.2000.847807
- [36] Pires, G., Nunes, U. and Castelo-Branco, M., Comparison of a row-column speller vs. a novel lateral single-character speller: Assessment of BCI for severe motor disabled patients. *Clinical Neurophysiology*, 123 (6), pp. 1168-1181, 2012. DOI: 10.1016/j.clinph.2011.10.040
- [37] Käthner, I., Ruf, C.A., Pasqualotto, E., Braun, C., Birbaumer, N. and Halder, S., A portable auditory P300 brain-computer interface with directional cues. *Clinical Neurophysiology*, 124 (2), pp. 327-338, 2013. DOI: 10.1016/j.clinph.2012.08.006
- [38] Shahriari, Y. and Erfanian, A., Improving the performance of P300-based brain-computer interface through subspace-based filtering. *Neurocomputing*, 121, pp. 434-441, 2013. DOI: 10.1016/j.neucom.2013.05.001
- [39] Vilic, A., Kjaer, T.W., Thomsen, C.E., Puthusserypady, S. and Sorensen, H.B., DTU BCI Speller: An SSVEP-based spelling system with dictionary support, 35<sup>th</sup> Annual Int. Conf. of the IEEE EMBS, pp. 2212-2215, 2013.
- [40] Wang, P.T., King, C.E., Do, A.H. and Nenadic, Z., Pushing the communication speed limit of a noninvasive bci speller, *CoRR* abs/1212.0469, 2012.

**R. Damaševičius**, is graduated from the Faculty of Informatics, Kaunas University of Technology (KTU) in Kaunas, Lithuania in 1999, where he received a BSc. degree in Informatics. He finished his MSc. studies in 2001 (cum laude), and completed his PhD. Thesis at KTU in 2005. Currently, he is a Professor in the Software Engineering Department, KTU and lectures in bioinformatics and robot programming courses. His research interests include brain-computer interfaces, bioinformatics, data mining and machine learning. He is the author or co-author of over 120 papers as well as of a monograph published by Springer.

**M. Vasiljevas**, is graduated from the Faculty of Informatics, KTU in Kaunas, Lithuania in 2011. He received a BSc. in Informatics Engineering. He finished his MSc. at the same university in 2013. Currently he is a PhD. student at Kaunas University of Technology and works as an assistant at the same university. His PhD. research is based on physiological computing, neural computer interface and machine learning.

**T. Šumskas**, is graduated from KTU in 2013. He received his BSc. degree in Informatics. Currently, he is finishing his Masters studies in Software Engineering. His Masters project is related to human-computer interaction, and text autocorrection using machine learning algorithms.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN  
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería  
de Sistemas e Informática

Oferta de Posgrados

Especialización en Sistemas  
Especialización en Mercados de Energía  
Maestría en Ingeniería - Ingeniería de Sistemas  
Doctorado en Ingeniería- Sistema e Informática

Mayor información:

E-mail: [acsei\\_med@unal.edu.co](mailto:acsei_med@unal.edu.co)  
Teléfono: (57-4) 425 5365

## HMI/ SCADA standards in the design of data center interfaces: A network operations center case study

Said Filali-Yachou <sup>a</sup>, Carina S. González-González <sup>a</sup> & Carlos Lecuona-Rebollo <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Department of Computer Science Engineering and Systems, University of La Laguna, San Cristobal de La Laguna, Spain, [saidfilali88@gmail.com](mailto:saidfilali88@gmail.com), [cjgonza@ull.edu.es](mailto:cjgonza@ull.edu.es)

<sup>b</sup> Department of Engineering, Institute of Technology and Renewable Energies, Tenerife, Spain. [clecuona@iter.es](mailto:clecuona@iter.es)

Received: February 18<sup>th</sup>, 2015. Received in revised form: March 16<sup>th</sup>, 2015. Accepted: September 26<sup>th</sup>, 2015

### Abstract

This paper presents an evaluation of interfaces at the Network Operations Center NOC (Network Operations Center) in terms of HMI standards and related regulations, as well as the ergonomic monitoring GEDIS guide. The Centre of Operations NOC at the Institute of technology and renewable energy (ITER) is responsible for monitoring the various infrastructures of the Data Centre such as the air conditioning, power supply, fire protection, security, technical centers, wind farms, photovoltaic plants, and different infrastructures deployed around the submarine cable belonging to the Consortium Cana-Link (the cable that connects the mainland and Canary Islands, the earth ring and the Network IRIS). To unify systems and facilitate the NOC personal's daily tasks, the ITER has been using the BMS system for SCADA software. However, BMS is a software specialist in the management of buildings, and as such BMS software was substituted by the new specialized system designed after this evaluation.

**Keywords:** Ergonomic, HMI, SCADA, Human Factors, Standards, Engineering of the Usability, Industrial Automation.

## Estándares HMI/SCADA para el diseño de interfaces en los centros de datos: El centro de control y operaciones como caso de estudio

### Resumen

En este artículo se presenta la evaluación de las interfaces de la sala del Centro de Operaciones NOC (Network Operations Center) del NAP (Network Access Point de Canarias), siguiendo estándares y normativas HMI, así como la guía ergonómica de supervisión GEDIS. En base a los resultados obtenidos, se presenta un prototipo de mejora de la interfaz actual. El Centro de Operaciones NOC del Instituto Tecnológico y de Energías Renovables (ITER) se encarga de monitorizar las diversas infraestructuras del Data Center como son la climatización, suministro eléctrico, protección contra incendios, seguridad, centros técnicos, parques eólicos, plantas fotovoltaicas, así como las distintas infraestructuras desplegadas alrededor del cable submarino perteneciente al consorcio de Cana-Link (el cable que une la Península y Canarias, el anillo terrestre y la Red IRIS). Para unificar algunos de estos sistemas y facilitar la tarea diaria de supervisión, se emplea un software SCADA especializado en la gestión de edificios.

**Palabras clave:** Ergonomía, HMI, SCADA, Factores Humanos, Estándares, Ingeniería de Usabilidad, Automatización Industrial.

### 1. Introduction

The objective of this work is to analyze and apply the NOC HMI/SCADA systems by applying different usability and accessibility techniques and standards. Additionally, we want to identify the main interface problems, and based on the results of the evaluation, give recommendations for

improvement. Specifically, in this work we have applied the ergonomic design guide (GEDIS), as well as several standards and proposals for the improvement of the actual control system rooms. Based on the results, a prototype is presented to improve the existing interface used by NOC (Network Operations Centre) operators.

In the human supervision and monitoring tasks that take

place in the industrial control rooms, there are aspects of security and physical ergonomics involved in the tasks, as well as factors relating to the engineering of usability, ergonomics and cognitive areas. These disciplines provide guidelines to apply and improve the design of the control room; these are focused on the user [1].

SCADA (Supervising, Control and data acquisition) [2] is the software used in these types of tasks and rooms. SCADA allows the industrial processes to be supervised and controlled from a distance and helps provide real time feedback at field level (sensors and actuators).

The task of informing the operator of all activities in an industrial process is performed by the Human-Machine Interface (HMI). As such, good communication is necessary between the operator and the automated control system. This communication process makes it possible to analyze different anomalies and modify parameters related to the control process. From a normative and operative point of view, the supervision is a delicate and essential task. So, this work guarantees the quality and efficiency of the process, and the operator is usually the decision maker with regards to the control actions.

Therefore, the HMI system must contain both graphical and numerical components. Also, the HMI must use standardized and clear terminology for the end user. In addition, it is recommended that the process and control variables should be as clear as possible for the user. And, also, a historical record of variables' variations should be kept in order to study their behavior and make the respective predictions.

## 2. Standards HMI/SCADA for industrial contexts

In this section we present those norms and standards that describe the HMI problem and present several norms, standards and criteria for industrial human supervision. We later describe some of the most important guides in industrial environments.

The ISO 11064 standard establishes principles, recommendations and requirements to be applied in the design of control centers. This standard proposes general-purpose aspects as well as aspects for its specific application in industrial control rooms. Ergonomics is principally used as physical ergonomics. This standard is divided into 5 basic parts that are listed below:

- Part 1: Principles for the design of control centers.
- Part 2: Principles for management control rooms and annexes.
- Part 3: Layout of the control rooms.
- Part 4: Distribution and size of the jobs.
- Part 5: Displays and controls.

This work has been based on Part 5, through the analysis of the NAP's current BMS. Please note that Part 5 has ergonomic principles and contains provisions and recommendations on indicators and controls as well as their interaction in the design of hardware and software of control centers.

The UNE-EN 9241 is important for work with DDSs (Data Display Screens) since we have to consider a number of issues that can negatively influence the physical and

mental capacity of the person who is working with a DDS. To avoid possible physical disorders such as muscular-skeletal, visual and eye problems, fatigue, as well as others, and considering ergonomic studies, the European Committee for Standardization, in collaboration with the International Organization for Standardization (ISO) promoted the development of the ISO 9241 and the EN-ISO 9241 standards, "Ergonomics Requirements of visual display terminals (VDT's) used for office tasks". These standards establish the ergonomic requirements for DDS equipment used in office activities, to ensure that users can develop their business safely, efficiently and comfortably. The receivers are the various actors involved in the design, manufacture, acquisition, and use of DDS equipment, as well as those responsible for directing and supervising the activities. While a significant portion of the content of the standard is dedicated to designing DDS equipment, the physical aspects of job design, the physical environment and the management and organization of work with other teams are also addressed.

The European standard EN-ISO 9241, approved by the European Committee for Standardization, should be taken entirely as standard by European countries' standardization bodies. In Spain, this rule is called UNE-EN 9241. The existence of potential problems mentioned above, coupled with the large size of the group of employees currently working with computer screens, justifies the existence of specific legislation on the subject. In Spain, the Royal Decree 488/1997, of April 14, and transposing Directive 90/270 / EEC both refer to the minimum safety and health requirements for work with display screens. This European Directive is the fifth individual Directive under the Framework Directive 89/391 / EEC on the introduction of measures to encourage improvements in the safety and health of workers at work. Both derive from the Directorate General V of the EU Council, and contain directives on safety and health at work.

Royal Decree 488/1997, of April 14, is currently the only legal standard governing Spain, and specifically refers to jobs that involve DDS. This norm addresses issues relating to the ergonomic designs in these types of jobs. However, ergonomic designs in these jobs require the use of more detailed specifications, which are also included in the rule.

There are other rules that apply in the areas of usability and cognitive ergonomics, these are:

- ISO 13407: This provides a guide to achieving quality in use by incorporating iterative activities involved in User-Centered Design (DCU).
- ISO 10075-1: Ergonomic principles that are related to mental workload.
- The DTS ISO 16071: Guidance on accessibility for human-machine interfaces. This Technical Specification (derived from ANSI HFS 200) provides guidelines and recommendations for the design of systems and software that allow users with disabilities to be able to access information systems (with or without assistive technology). It includes users with low vision, hearing impaired users, deaf users, users with physical and cognitive disabilities, and elderly people.
- IEC TR (International Engineering Consortium Technical Report) 61997: This technical report provides general

principles and detailed design guidelines for the selection of the means of communication, and the mechanical, graphical and auditory user interfaces.

- Human Factors Design Standards (HFDS): Human factors principles and practices are integrated into the procurement, design, development, and testing of the United States Federal Aviation Administration (FAA) systems, facilities, and equipment.
- Human Interface Design Review Guidelines (NUREG 0700): Human factors engineering (HFE) on aspects relating to nuclear power plants are in accordance with the United States standard review plan.
- Safety Automation System (SAS) NORSOK: This petroleum industry of Norway standard covers technical requirements and establishes a basis for engineering related to safety and automation system design.
- Man System Integration Standard (NASA-STD-3000): This standard provides user information to ensure the proper integration of the man-system interface with other aerospace disciplines.
- The EEMUA 191[3] standard is a set of guidelines for alarm management. This work has evaluated D-ALiX system alarms and events, which measures the ratios set by the EEMUA standard, the average number alarms per hour, the maximum number of alarms per hour, operator response time, etc.
- The GEDIS guide [4]: This guide provides a methodology based on the area of knowledge of ergonomic design and interface monitoring. GEDIS encompasses aspects of interface design, cognitive ergonomics, usability and human-computer interaction to improve reliability and efficiency of the systems in the control room. This methodology collects and takes into account the principles of previous standards, and it is specifically designed to supervise a control room. For this reason GEDIS has been chosen for our work as a reference guide to assess and improve the control room interfaces and the monitoring system.

In the next section, the NAP current control system (BMS) is described. The GEDIS is applied to this BMS to assess the accomplishment of HMI standards and to see areas that should be improved. Then, prototypes are described, that have been developed as a solution to the problems identified in the assessment.

### 3. Case of study: the NOC at ITER

The Operations Center (NOC) at the Technological Institute of Renewable Energies (ITER) is responsible for monitoring several Data Center infrastructures, such as: air conditioning, power supply, fire protection, security, technical centers, wind farms, photovoltaic plants, and different infrastructures deployed around the consortium of Cana-Link (the cable between the mainland and the Canary Islands, ground ring and the IRIS Network) submarine cable. To unify some of these systems and facilitate the daily task of NOC personnel, ITER SCADA software is used as a BMS system (Fig. 1). The BMS is specialized in building management software. The principle of operation of this type



Figure 1. Operations Center (NOC) Interfaces at the Technological Institute of Renewable Energies (ITER).  
Source: The authors.

of software is similar to other technologies that specialize in industrial automation (i.e., it has a graphical environment that allows drivers to be programmed, as well as the typical instrumentation for these types of projects).

The application is divided into five modules: a) module reading network, b) module data analysis and storage, c) data block, d) reports module, and e) user interface module (Fig. 2). Three of these interface modules (module data analysis and storage, module data and reporting module) have Web Services (WS). The module of network decoder handles the ALiX [5] network data collection devices. This module periodically interrogates the network obtaining status, alarms and variables, and this information is sent to the data analysis and storage module for processing. Based on the analysis of the variables, new alarms are generated and added to existing ones and the importance (weight) is assigned. Finally all this information is stored in the Data Module.

The analysis and data storage module is also responsible for storing the raw data for the last reading of each of the devices on the network. Only the last reading of each device is stored, which eliminates the previous data from other devices in the raw. This information can render a real time image of what is happening on the network.

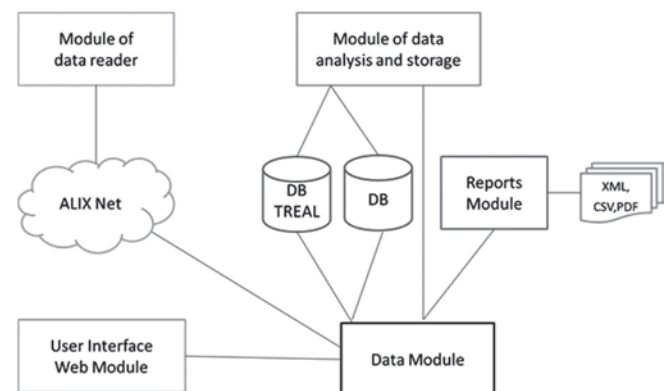


Figure 2. BMS Structure ALiX 2.0  
Source: The authors.

|                                   |                                                    |                            |
|-----------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------|
| <b>MLR:</b> Reader Network Module | <b>MDD:</b> Data Module (R/W)                      | <b>MDI:</b> Reports Module |
| <b>MWU:</b> User Interface Module | <b>MAA:</b> Module of analysis and storage of data |                            |

The following statements reflect the relationships between the modules in Fig. 1 and protocols that use:

A) MLR =>ALiX Net: Interrogate HTTP, SNMP and Modbus

B) MLR => MAA: HTTP-XML message Shipping WS

C) MAA => BD Trealt: Query SQL ADODB

D) MAA => BD: Query SQL ADODB

E) <=> MAA MDD: Bidirectional HTTP-XML message sending WS

F) MDD <=> MDI: Bidirectional HTTP-XML message sending WS.

The Data Module (R / W), from the stored information, provides all the methods to obtain useful information for the user (last alarms, unacknowledged alarms, historical events, etc.), the user interface module reporting and also makes use of this information for their operation. The Data Module also provides methods to interact with network devices (off / on groups, change set points, etc.) and, through the WS interface, three of the modules allow external applications to provide and obtain application data.

#### 4. Applying the GEDIS guide and EMMUA to the NOC's BMS and SCADA systems

The GEDIS guide has been prepared to design information systems centered on the user [6], focus on the formalization of ergonomic criteria [7] work, and the Nielsen's [8] heuristic guidelines. One of the differences from the previously developed methodologies is that the GEDIS guide provides generic guidelines on ergonomic design criteria, and offers a numerical evaluation method to assess the quality of the interface.

The guide is divided into 2 parts. In the first part, a set of selected indicators for multimedia interfaces design guidelines used by computer engineers and computer experts interacting person are detailed [9]. Moreover, the second part of GEDIS shows the quantitative measures of evaluation to give a final numerical value. This final value allows the designer / user to evaluate possible improvements in the monitoring interface. So, this value allows for a comparison with other interfaces. The evaluation is expressed in numeric form (quantitative format) or in a qualitative format. The equations to measure the indicators are the following:

$$\text{Equation (1): Indicator} = \frac{\sum_{j=1}^J w_j \text{Subind}_j}{\sum_{j=1}^J w_j}$$

$$\text{Equation (2): Global_Eval} = \frac{\sum_{i=1}^{10} p_i \text{ind}_i}{\sum_{i=1}^{10} p_i}$$

The first equation determines the value of each indicator using the sum of the respective sub-indicators, divided by the number of sub-indicators for each indicator. In the second equation, the total global assessment of the interface is

determined as the result of the sum of the indicators divided by the number of indicators.

Both equations include identical weight indicators and sub-indicators, which are intended to cover different aspects of the interface design.

Below, Table 1 shows the results obtained for the current BMS considering the GEDIS indicators guide, where a = appropriate, m = medium and na = not appropriate.

The evaluation obtained in Table 1, was performed by the BMS supervisor, six NOC operators and the designer of the system, using the criteria contained in the GEDIS guide and standards regulations. The results obtained through the quantitative evaluation of the BMS are correct at a general level, but the evaluation detected areas for improvements for the Text and Status Devices indicators.

Table1.  
GEDIS Evaluation of the BMS.

| <b>Name indicator</b>                    | <b>Numeric Range/qualitativeBMS</b> |
|------------------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Architecture</b>                      | <b>4,3</b>                          |
| Map existence                            | [YES, NO] [5,0] 5                   |
| Number of levels: le                     | [le<4, le>4] [5,0] 5                |
| Division: plant, area, subarea           | [a, m, na] [5, 3, 0] 3              |
| <b>Distribution</b>                      | <b>4</b>                            |
| Model Comparison                         | [a, m, na][5,3,0] 4                 |
| Flow process                             | [clear, medium, no clear] [5,3,0] 4 |
| Density                                  | [a, m, na] [5,3,0] 4                |
| <b>Navigation</b>                        | <b>5</b>                            |
| Relationship with architecture           | [a, m, na] [5,3,0] 5                |
| Navigation. between screens              | [a, m, na] [5,3,0] 5                |
| <b>Color</b>                             | <b>4,2</b>                          |
| Absence of non-appropriate combinations  | [Yes, No][5,0] 5                    |
| Color number c                           | [4<c<7, c>7][5,0] 5                 |
| Blink absence ( no alarm situation)      | [Yes, No][5,0] 5                    |
| Contrast screen versus graphical objects | [a, m, na] [5,3,0] 3                |
| Relationship with text                   | [a, m, na] [5, 3, 0] 3              |
| <b>Text font</b>                         | <b>3,25</b>                         |
| Font number f                            | [f<4, f>4][5, 0] 5                  |
| Absence of small font (smaller 8)        | [Yes, No][5, 0] 0                   |
| Absence of non-appropriate combinations  | [Yes, No] 5                         |
| Abbreviation                             | [a, m, na][5,3,0] 3                 |
| <b>Status of the devices</b>             | <b>2,5</b>                          |
| Uniform icons and symbols                | [a, m, na][5, 3, 0] 5               |
| Status team representativeness           | [Yes, No][5,0] 0                    |
| <b>Process values</b>                    | <b>4</b>                            |
| Visibility                               | [a, m, na][5, 3, 0] 5               |
| Location                                 | [a, m, na][5, 3, 0] 3               |
| <b>Graphs and tables</b>                 | <b>4</b>                            |
| Format                                   | [a, m, na][5, 3, 0] 5               |
| Visibility                               | [a, m, na][5, 3, 0] 3               |
| Location                                 | [a, m, na][5, 3, 0] 3               |
| Grouping                                 | [a, m, na][5, 3, 0] 5               |
| <b>Data-entry commands</b>               | <b>5</b>                            |
| Visibility                               | [a, m, na][5, 3, 0] 5               |
| Usability                                | [a, m, na][5, 3, 0] 5               |
| Feedback                                 | [a, m, na][5, 3, 0] 5               |
| <b>Alarms</b>                            | <b>5</b>                            |
| Visibility of alarm window               | [a, m, na][5, 3, 0] 5               |
| Location                                 | [a, m, na][5, 3, 0] 5               |
| Situation awareness                      | [Yes, No] [5, 0] 5                  |
| Alarms grouping                          | [a, m, na][5, 3, 0] 5               |
| Information to the operator              | [a, m, na][5, 3, 0] 5               |

Source: The authors.

The improvement changes introduced in the Text and Status Devices indicators were the following: a) the display of incidents increased the font size for alarm events, warning and without communication; b) the status indicator devices were optimized to use the BMS Server resources. Previously the "Unifilar" and the D-ALiX SCADA screens were working at a very low level when they established communications with Modbus gateways level devices. Our work has changed the work logic so that the device status is queried in terms of SQL queries in the database, as well as their spread to usability.

Also, besides the application of the GEDIS guide, international standards have been taken into account, such as ISO 11064 and 191 EEMUA [10]. The evaluation of the performance of BMS Alarm Systems has yielded positive results. These results include the fact that the number of alarms that may occur in 10 minutes is less than 2, and, as such, the system is manageable for operators. The number of alarms that may occur during the first 10 minutes after the first critical alarm that occurred is dependent on equipment fails. In the system that was analyzed there are 7 alarms that could trigger. Therefore, this is a lower number than the value established by the EEMUA 191 standard, which has a 10-alarm maximum. So, the management system is predictable.

## 5. Design and development of new user interfaces

Once evaluated, the BMS interface, and various improvements to the redesign of the interface of several screens have been proposed, as well as their relocation. Thus, the old SCADA system display used in the NOC for the monitoring of the Power Plants was improved and integrated in the BMS. For example, in the old interface, the detection of an alarm on the plant "Suelo" was painted a red pixel color, which is difficult to be detected quickly by the human eye. For this reason, it is necessary to show the view in order to display this alarm. Therefore, the Wonderware SCADA system was substituted with this new system.

Currently, with the new screen, the NOC operator can easily detect the alarms, reminders or communication failures of both inverters as well as the photovoltaic plants. Also, with this new screen, you can see the production of solar power plants, temperatures of inverters and solar irradiation in real time.

To develop a prototype that includes the improvements identified in the NAP's SCADA systems, it has also had been necessary to contemplate the integration of the same system into the BMS. The technologies used for this development have been popular Web technologies such as PHP 5.5, HTML5, CSS3, JavaScript and MySQL, in addition to a specific library of PHP that works on a ModbusPhpModbus level.

ITER opted for this solution because of the staff's previous knowledge of these technologies, as well as the need to develop their own software, independent of any manufacturer and with no license cost. Above all, this solution was chosen due to scalability; since the D-Alix has deployed just a 1st phase, for the future it will expand up to 2 more phases and, therefore, in the BMS the number of devices that may be added is unlimited. The number of

devices that can be added limit the amount of available resources.

### 5.1. Improvement of SCADA system Photovoltaic Plants

In an assessment carried out in all the ITER SCADA systems, the Wonderware photovoltaic plants system is the one that is less usable and that is more complex to work with, as well as being the one that has received the most negative comments. The most appropriate solution to this system has been the integration of new screens in the BMS, as well as skips in a new solution SCADA. For the realization of these new displays, the methodology carried out was to conduct focus groups formed by members of the NOC, as well as with the supervisors of the BMS, in order to analyze the problematic aspects of the interface and then perform several mockups or sketches of screens with different proposals. Once the Mockup of the screen design was selected, it proceeds to translate the sketch into a web design, making use of HTML5 and CSS3. This screen allows the NOC operator to know the status of the inverter and the plant, the total production, production of the inverter and solar irradiation of the plant's location. In this way, with this screen and the drop-down window of each inverter, the 3 levels of the Wonderware system are suppressed, in addition to obtaining a clean screen and being able to easily detect alarms.

The next step, to locate all the devices, was the complete inventory of all inverters that form the photovoltaic plants, as well as the identification of all the Modbus gateways - TCP/IP. Because the PV power plants were previously built in Wonderware SCADA, the inventory of all devices was a difficult task.

Before proceeding with the design of the final template, some tests were carried out with the inverters in the design of a provisional screen to test if the reading of the alarms of the inverters was correct. The memory map of the type of inverters was assessed in order to detect which were the necessary records for later reading, and then they were integrated into the database of all the BMS devices.

A screen to monitor multiple inverters of different photovoltaic plants, specifically the Red Farm, was designed. Another screen was designed to monitor the inverters of the "Fincaroja y verde" plants.

Now, we proceed with the insertion of all inverters in the database, and in this way we store the records of readings associated with each inverter. The insertions to the database of Devices are the following data:

```
Insert
IntoDevices(Id,Name,System,DevicesTypes_Id,Domain,Sub
domain,Address,Status)
values
(247,"7A",9,16,2,101,"192.168.24.17 1","B");
```

Where the data inserted are the identifier of the inverter, the name of the inverter, the device type, domain, subdomain, and the IP address of the Modbus - TCP gateway that contains the particular inverter.

We decided to do a redesign of the dynamic screens, using PHP. This decision was taken considering future

scalability, since you could automatically try to add new photovoltaic plants, without the need for a screen redesign but by simply including the new subdomain of the plant, and the inserts in the database. Previously, with a static screen, it would have been necessary to create tables for the new plants. Also by making the system with dynamic screens it will allow a minor preload time for the states of the inverters.

In the deployment of the new screen, there have been multiple incidents. One of them is that, at dusk, the inverters do not produce energy, therefore the BMS detects the non-production as an incident alarm, and the system would collapse with the total number of alarms from the 542 inverters. So, it was decided to temporarily change the status of all inverters to off to prevent saturation of the alarm system, and especially the distraction of the NOC operators.

To take this problem into account we thought of different solutions, one of them was to fix the schedule of the inverter readings, but this solution was not very appropriate, since the changes are not fixed schedules between summer and winter. Finally a more effective and efficient solution was found: considering that the number of alarms that are triggered in the incident is only one, a message of photovoltaic warning was indicated, which in turn encompasses all of the 542 investor alarms.

Finally, we proposed a second screen, which also shows the status of the photovoltaic plant. It could discover the status of a particular inverter and for that reason a JavaScript Popup was used; when you click on an inverter it shows the instantaneous power, continuous voltage, the temperature and the status of the inverter. To monitor the main BMS screen -the Wall- a screen was designed that monitors the status of each photovoltaic plant.

## 5.2. Interfaces proposal for the ITER cleanroom

The integration of the BMS with the Clean Room takes place through the alarm monitoring of the data acquisition card of the subsystems of nitrogen gas and cabin photovoltaic laboratory. This integration should be done on a screen as well as in the wall of the BMS. This ensures the 24x7 monitoring of the Photovoltaic Laboratory by the NOC.

In order to monitor these variables, the design, implementation and integration of a summary screen in the BMS application has been undertaken for real-time monitoring of the Photovoltaic Laboratory. In addition, it is necessary to add the integration of audible alarms that are assigned according to how critical they are.

In summary, the objective that has been completed with this integration is the acquisition and monitoring of a company's cabinet gas-control. Data acquisition will be made through the MPORT -Rev2 III card, which is properly configured for this purpose. Monitoring is performed via the Modbus communication protocol TCP/IP. The interfaces have been designed following a previous mockup to monitor alarms. There are two actuators; one is "Alarm Reset" and the other "Remote Shutdown". The first allows the audible alarm to be reset and the second runs the safety mechanism that prevents leakage of these gases. So, a screen to monitor the clean room on the wall was designed.

## 5.3. Visualization of HMI Data of the Big Data Systems

The D-ALIX supervisors need to know about the consumption of the different equipment located at the NAP. To study these statistics, the ITER uses "Pentaho", which is a suite composed by a set of free programs to generate business intelligence, including built-in tools to generate reports, data mining, etc. Due to the fact that "Pentaho" is running on a different server and in addition to the latency of the graphics of consumption display, the need to employ a web technology was identified in the draft D-Alix, in order to integrate these graphs in the BMS.

For this reason, to integrate the graphics display in this work a Google API (Google Charts) has been used. Three possibilities were analyzed to choose which graphics API to use: D3, js and Google Charts. The last option was selected because of its power. The DalixConsumption database was used to show the data, which is formed by 136 tables belonging to the various devices to be monitored. In turn, each table is made up of millions of records.

The consumption graphs represent the total consumption of the NAP, D-ALIX climates, photovoltaic plants, Line NAP to ITER, general NAP services, the supercomputer, as well as the indicator PUE (Power Usage Effectiveness), which is a variable defined by the Green Grid as an

bms2.iter.es/app/linea\_nap.php

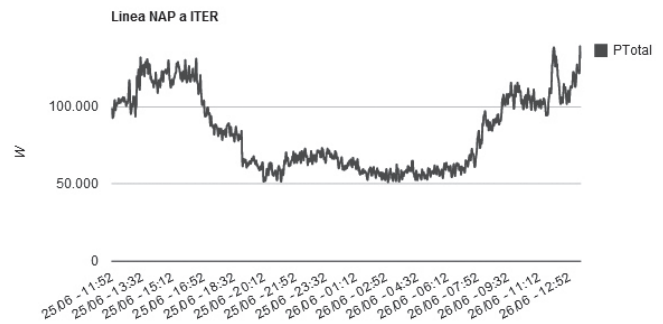


Figure 3. Line from NAP to ITER.  
Source: The authors.

bms2.iter.es/app/pue.php

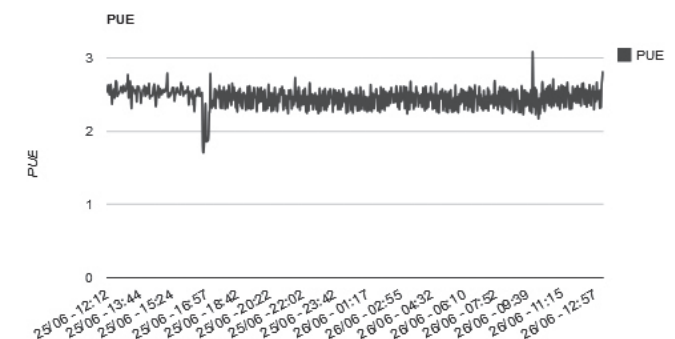


Figure 4. PUE indicator.  
Source: The authors.

instrument to measure the efficiency of data centers. It compares the total energy consumed by a data center with the amount of energy that actually reaches the IT equipment, reporting on the amount lost by other computers, such as cooling systems. Several interface graphics have been implemented to represent the consumption of serial dispositives employed in the Data Center. For example, Fig. 3 represents the line between the ITER and the Network Access Point and Fig. 4 specifies the indicator and Power Usage Effectiveness (PUE).

## 6. Conclusions

The GEDIS guide is a methodological approach that combines the efforts of engineering systems and ergonomics to improve the efficiency of the human-machine systems in industrial control rooms.

This work was done together with NOC supervisors and operators. Note that it is essential to reflect on the experience of the operator of the control room in the supervising task, as well as the technical team responsible for developing the application.

The relation between the engineering of the usability and the design of control room allows professionals in various areas such as systems engineers and computer engineers, together with the ergonomics professionals, to work with the same approach to develop an optimal industrial control application.

The application of the GEDIS guide in the case studies provides a series of indicators over different aspects of the interface that allows these aspects to be attended to and improved. Also, this guide can be an index of global quantitative assessment over the state of an actual interface after applying the corrective measures. For this reason, we believe that it is an ideal tool to work together with the standard employees of this work to achieve the evaluation and continuous improvement of systems that are alive and remain in constant growth.

The valuation obtained after the completion of the assessment is a very good result. The new system for the NOC makes the detection of alarms produced easier, compared to the Wonderware SCADA initial screens.

The technologies used for the design of the new interfaces, PHP, HTML5, CSS3, JavaScript, etc., are all very popular technologies that are easy to work with. Not using proprietary technologies from different manufacturers allows for easy integration with the Building Management System (BMS) that was developed in these popular technologies. This is shown by the ease of scalability, as well as integration with the hardware devices. In this case we have been able to demonstrate that a wind and photovoltaic energy control center used for to monitor a Data Center Systems, as well as a system of submarine and terrestrial telecommunications is extensible to any type of control center, for example aircraft, rail, nuclear, maritime navigation, etc.

The Big Data Systems recorded large amounts of information on a daily basis, making their representation a difficult task. An easy way to represent HMI data has been demonstrated in this work, which is fast and objective for the user to undertake further analysis.

## Acknowledgement

The authors would like to acknowledge the contribution of the Engineering Department of the Institute of Technology and Renewable Energies (ITER), for their support with this work.

## References

- [1] Asensio, P.P., Garcia, B.A. y Boladeras, M.D., Evaluación de la usabilidad para la tarea de supervisión humana en sala de control industrial, 2009.
- [2] Penin, A., Sistemas Scada, 2011.
- [3] Ponsa, P., Amante, B. and Díaz, M., Evaluation of the usability of the human supervising task in the control room of an industrial room., *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial (RIAI)*, 6 (1), pp. 84-93, 2009. DOI: 10.1016/S1697-7912(09)70079-2
- [4] Ponsa, P., Vilanova, R., Díaz, M. and Gomá, A., Interface design improvement in supervisory control. *E-Minds: International Journal on Human-Computer Interaction*, 1 (3), pp. 21-36, 2007, ISSN: 1697-9613.
- [5] Shang, W., Ding, Q., Marianantoni, A., Burke, J. and Zhang, L., Securing building management systems using named data networking, *IEEE Netw.*, 28 (3), pp. 50-56, 2014. DOI: 10.1109/MNET.2014.6843232
- [6] Granollers, T., Lorés, J. y Cañas, J., Modelo de Proceso de la Ingeniería de la usabilidad y de la accesibilidad. *MPLu+ a*, 2010.
- [7] Scapin D. and Bastien, J., Ergonomic criteria for evaluating the ergonomic quality of interactive systems, *Behav. Inf. Technol.*, 1997.
- [8] Nielsen, J., Usability Engineering. 1994.
- [9] Shneiderman B. and Plaisant, C., Strategies for evaluating information visualization tools: Multi-dimensional in-depth long-term case studies, *methods Inf. Vis.*, 2006. DOI: 10.1145/1168149.1168158
- [10] Aas, A.L. and Skramstad, T., A case study of ISO 11064 in control centre design in the Norwegian petroleum industry, *J. Appl. Ergon.*, 42 (1), pp. 62-70, 2010. DOI: 10.1016/j.apergo.2010.05.003

**S. Filali-Yachou**, received his BSc. in Computer Science Eng. in 2014 from the University of La Laguna, Spain. His research focused on industrial automation and usability in information systems. He has several years of experience in the analysis of software development.

**C. S. González-Gonzalez** received her PhD. degree in Computer Science in 2001 from the University of La Laguna, Spain. She is an associate professor in the Computer Engineering Department at the University of La Laguna, Spain. Her main focus areas of research are related to human computer interaction (HCI), natural and adaptive interfaces, serious games and gamification in Education and gender in HCI. Also, she has a wide experience in e-learning best practices and LMS systems.

**C. Lecuona-Rebollo**, received his BSc. in industrial engineering in 2008 from the University of La Laguna. After finishing his studies, he did an internship for six months at the Institut Laue-Langevin Neutrons for Science (ILL) in Grenoble. In this period, he worked in the Computer Science department developing software for different scientific purposes. After this period he started to work for the Instituto Tecnológico y de Energías Renovables in Tenerife, where he is currently working in the ALiX project. He is responsible for the distributed control system.

# Agile human centered methodologies to develop educational software

Carina S. González-González, Pedro Toledo-Delgado & Vanesa Muñoz-Cruz

*Escuela de Ingeniería y Tecnología. Universidad de La Laguna, La Laguna, Tenerife, Spain {cjgonza;petode;vmunoz}@ull.edu.es*

Received: February 02<sup>nd</sup>, 2015. Received in revised form: March 24<sup>th</sup>, 2015. Accepted: September 28<sup>th</sup>, 2015

## Abstract

This paper presents a methodological proposal that is based on powerful current approaches to the software development process: agile methodologies (SCRUM, Lean UX), user-centered design (UCD) and user experience design (UXD). Specifically, we have adapted some of the characteristics of the agile methodologies, which have allowed us to produce useful prototypes that are focused on the users while receiving constant feedback from them. The main goal of the proposed methodology is to identify usability problems and UX factors in the early stages of educational software development. Furthermore, we have also applied and validated the proposal during the framework development of an educational software project for users with special educational needs. A specific case taking into account key usability issues to support students with special education needs (SEN) is presented. In conclusion, we state that the proposed methodology could be a good design process philosophy to follow in the development of software projects in general, and in educational projects in particular.

**Keywords:** UCD, UXD, SCRUM, Human Factors, Usability, Prototyping.

# Metodologías ágiles centradas en personas para desarrollar software educativo

## Resumen

Este artículo presenta una propuesta metodológica basada en los enfoques actuales del proceso de desarrollo de software: las metodologías ágiles (SCRUM), centradas en el usuario (UCD) y el diseño de experiencia de usuario (UXD y Lean UX). Así, hemos adaptado algunas de las características de las metodologías ágiles que nos han permitido producir prototipos centrados en los usuarios con retroalimentación constante de ellos. El objetivo principal de esta propuesta es identificar problemas de usabilidad y factores UX en las primeras etapas de desarrollo de software educativo. Además, hemos aplicado y validado esta propuesta en el marco de un proyecto de software educativo para los usuarios con necesidades educativas especiales. La metodología propuesta puede ser una buena filosofía de diseño a seguir en los proyectos de desarrollo de software en general, y en proyectos educativos en particular.

**Palabras clave:** UCD, UXD, SCRUM, HCD, Agile UX, Lean UX, Factores Humanos, Usabilidad, Prototipado.

## 1. Introduction

The user-centered design (UCD) philosophy indicates that the software development process must be focused on the users rather than on the developers [1]. Nowadays there seems to be an increase in the concern regarding user satisfaction and in the willingness to provide a software solution that fulfills the needs of the customer. This seems to be more important than including other functionalities that developers find useful and that generally only contribute to

making the application more complex and less usable.

Furthermore, UCD is mostly approached by sticking with the four traditional phases of the software development (analysis of requirements, design, implementation and deployment), which usually means development based on a traditional heavyweight work methodology. The great novelty of the UCD is that it pays special attention to the customers and final users of the product. Hence, prototypes are included as a crucial part of the process, as they are fundamental to understand requirements and to improve

usability. These prototypes are continuously validated during meetings, in which this functional software is examined carefully by the experts, customers and final users, usually including a usability test with them [2].

Moreover, rapid or agile development models [3] are being introduced to usability engineering. This approach is based on the mix of agile processes (especially Scrum) with user-centered techniques (e.g. [4]). For example, consider design and user involvement inside sprints [5]. In contrast with the traditional software development model, the agile approach involves the user in the design, development and testing. Additionally, Agile methodologies such as Scrum [6] or XP [7] avoid fixed phases and downplay the role of the analysis and design stages, instead focusing on the implementation by an iterative approach. Therefore, requirements are met through client feedback on the implemented uncompleted software during several meetings. Design and architecture emerge out of refactoring, after coding [8]. Furthermore, agile methodologies, and Scrum particularly, provide us with a fixed duration for each one of the iterations, allowing the team to fix the sprints duration and, therefore, we are given a schedule and framework to develop certain amount of functionalities [9].

Some characteristics of agile methodologies can be very useful in the user-centered design. For example, the principle of producing useful prototypes is in keeping with the aim of user testing that it desired for new functionalities. In addition, one of the benefits of agile methodologies is that they welcome changing requirements, despite how advanced the project is [10]. Hence, lightweight development boosts individual motivation in the development team and avoids the excessive amount of documentation and rigid phases of traditional approaches that in general discourage and demotivate the development team. In terms of UCD, a lightweight methodology cannot be used in its entirety due to its quality of being developer-centric. This is a cause of the disagreement expressed by some authors; [11] nevertheless, there are many ideas that come from agile methodologies that could be found interesting while trying to start a project that has the aim of having an UCD approach and motivating the development team while at the same time speeding up the actual development. In fact, there are some authors [12], as well as companies [13] who have already successfully mixed UCD with an agile development methodology: with a high rate of satisfaction.

In relation to user centered design and Agile methodology, a philosophy has been developed recently: Lean UX [5]. This philosophy has three main components: design thinking, Lean production and Agile development. Lean UX considers the software as a hypothesis of what the user might need. So, the user test attempts to confirm if this hypothesis is valid or not. In this sense, the users must be represented in the development process [14,15]. The most common methods to represent users in agile software development are “personas” or “protopersonas”. These methods are actively utilized in user stories. User story is a de facto standard way to describe system functionality in Agile [16]. User stories refer to personas who desire to achieve identified goals through specific actions. As such, our approach uses the “personas” method.

Thus, in the design and development of our educational software projects, we found that it is even more important for designers to have a framework for identifying usability problems in early designs and also in more mature prototypes. So, we decided to adopt some interesting ideas from user-centered design (UCD), user experience design (UXD) and agile methodologies (SCRUM, Lean UX) [17] in order to be able to produce useful prototypes from an early stage [18-20]. Additionally, our proposal also allows us to focus on the software design by making use of the users’ requirements.

In this paper we use our methodological approach to investigate the interaction design and usability of an interactive interface to solve addition and subtraction algorithms tailored for students with learning difficulties: Down syndrome (DS). We focus on finding the human factors in software design relating to the particular characteristics of DS students. The rest of the paper is organized as follows: first, we describe the Agile UXD approach that applies to our project. We then present the educational software design and studies on it (participatory design, persona technique, prototyping testing, usability testing) that have been carried out by experts. Finally, conclusions are presented.

## 2. Development of an educational software with agile methodologies

The most important roles in the learning process are those of the teachers and students. Thus, we will have to pay attention to two different roles involved in the development of e-learning platforms: the learners and the educational experts. Therefore, to be successful, the development of e-learning tools should follow a user-centered design that is focused on the two roles within the e-learning projects.

From the educational experts we will obtain advice in the first stages of the development as they are familiar with the learning process and they know the best practices to ease the learning process. In the later stages we will take into consideration the opinion of the future users of the tool: the learners. In their case, the main source of feedback will be the usability tests that they will carry out. As in the case of standard UCD, this approach usually involves the use of heavyweight methodologies that not only usually produce fewer amounts of useful prototypes during the development process, but also make the meetings more few and far between, thereby reducing the participation of users and experts during the development stage. Having less useful prototypes and meetings, we cannot carry out enough usability tests to have the views of users and experts reflected in the system. Moreover, the changing requirements are much more difficult to introduced. These factors could lead to dissatisfied end users [20].

The development of e-learning applications through agile methodologies, in which the design is traditionally developer-centered, could result in a lack of usability tests with users and experts, as well as insufficient advice from the educational experts. This is often a very serious shortcoming for the project as frequently, when the experts and learners are set aside throughout the e-learning tools development

process, the final product does not meet their needs. This means that it has been developed without their advice and this means dismal failure and a waste of time and money.

However, we strongly believe that better outcomes can be achieved in the development of e-learning systems with a combination of agile development, based on short sprints and the development of iterative incremental prototypes. These should have usability tests performed by learners and educational experts during various review meetings of different sprints. All the feedback provided by them should then be taken into consideration thus preserving a learner-centered design while undertaking an agile development. Hence, our final development methodology, especially after the first weeks of analysis and design, was a variation of SCRUM mixed with UCD. In our methodology, the sprints had a one-week duration and, as a result, always produced a prototype. The product backlog was set at the very first stage of the project and was enriched with new ideas throughout the successive sprints. Moreover, in every sprint planning meeting, a series of tasks from the product backlog were planned for the subsequent sprint, as a sprint backlog. Furthermore, we had sprint review meetings and sprint retrospectives. In the first of these two meetings, we reviewed and discussed the advances during the sprint, and we usually carried out some tests with educational experts and sometimes also with end users (children). In the sprint retrospectives the IT team reflected on the past sprint, considering possible improvements and solutions to the problems encountered. The roles in the meetings were rather similar to those of the original SCRUM, where the educators had the role of Product Owner and one member of the IT team was the Scrum Master.

The approach consists of several stages that are iteratively executed: requirements analysis, user analysis, prototyping and evaluation. UCD is specified in ISO 13407— Human Centered Design Processes for Interactive Systems (ISO 13407:1999) [21]. It is both a broad philosophy and variety of methods, but the important concept is that users are involved in the entire process [22]. In this sense, the roots of User Experience Design (UXD) [23] can be found in the principles of Human Centered Design, which can be summarized as:

- Positioning the user as a central concern in the design process.
- Identifying the aspects of the design that are important to the target user group.
- Developing the design iteratively and inviting users' participation.
- Collecting evidence of user-specific factors to assess a design.

In principle, UXD is no different from UCD [24]. However, UXD adds important dimensions, such as User Experience (UX) factors [25]. While traditional usability factors were largely related to performance and smooth interaction, new UX factors relate to effect, interpretation and meaning. Some UX factors, such as social and aesthetic aspects, are likely to be very different in character from the traditional concerns [26]. This presents UX practitioners with significant challenges in terms of identifying which UX factors they need to consider when embarking on a design

project. In any case, it is usual that a design team will only be able to deal with a few critical UX factors that influence the suitability of the design for a typical usage situation. Consequently, a big challenge for design teams is to make sense of the available information during the early phases of the UXD process. In order to capture UX factors during the early development stages, we believe that heuristics can particularly be a fast and cost-efficient but still effective and accurate evaluation method of user experience.

Heuristic evaluation is one of the so-called expert-based usability inspection methods [27]. It is an efficient analytical and low-cost usability method that is to be repeatedly applied during a development process, starting at the very beginning of a project design circle [28]. In a traditional user-interface evaluation, three to five experts (in the field of the application, usability or both) inspect a system according to recognized and established usability principles. Thus, our research group is formed by computer science engineers, educators, graphic designers and psychologists, which allow us to test the tools with the experts. However, we also tested tools with children as final users, who were supervised by the interdisciplinary team to capture UX factor requirements from their usage.

In the next section, we describe the application of the agile human centered methodologies to a particular case: the EMATIC software design and development.

### 3. Educational software proposal: EMATIC

EMATIC is a multi-device web tool that is oriented towards digital tablets and mobile phones, to teach basic mathematical operations to children with SEN. The software is adapted to mobile devices and aimed at two distinct profiles: adults such as the specialists who need to create quick and easy educational and cognitive rehabilitation activities and SEN children who need friendly and fun software with which to perform the activities recommended by specialists.

Due to the special characteristics of our target population, for the design of our first prototype, we took into account the methodologies that guide universal and inclusive design [29-31]. Moreover, we also considered the seven principles proposed by the Center for Universal Design at North Carolina State University (1997) [32]:

- Equitable use: the design is useful and marketable to people with diverse abilities.
- Flexibility in use: the design accommodates a wide range of individual preferences and abilities.
- Simple and intuitive use: use of the design is easy to understand, regardless of the user's experience, knowledge, language skills, or current concentration level.
- Perceptible information: the design communicates necessary information effectively to the user, regardless of ambient conditions or the user's sensory abilities.
- Tolerance for error: the design minimizes hazards and the adverse consequences of accidental or unintended actions.
- Low physical effort: the design can be used efficiently and comfortably and with a minimum of fatigue.

- Size and space for approach and use: appropriate size and space is provided for approach, reach, manipulation and use regardless of the user's body size, posture or mobility.

Additionally, for the learning design, we consider students' main difficulties in specific learning areas. Errors provide us with information to improve the teaching-learning process in our system. Research with children without disabilities shows a very wide range of errors in basic mathematic operations [33,34].

Furthermore, several requisites were considered when designing the interface of our first prototype in an effort to overcome the problems faced by DS children. These were problems such as language problems, difficulty in the transference and consolidation of learning and fine motor skills problems.

Technologically, the system was developed in Python language and one can chose between MySQL, PostgreSQL and Oracle as a database engine. The interfaces are based on HTML5, CSS3 and JavaScript. This web platform gives access to different users of the application (students, teachers or administrators), and allows each role to access only the granted processes and assigned actions (Fig. 1).

Furthermore, the system has been designed with modular software architecture. The topic that is to be taught is defined in the *domain module*. The individual characteristics of the student and the individual knowledge about the domain are stored in the *student model*.

EMATIC also includes a module for creating educational activities, which allows the educational professionals to design custom activities for a pupil or group of students (*authoring module*). Those designs may be either completely fixed, or allow randomized variations of the activity in an adapted sequence to the student. This module allows pedagogical experts to be able to design and construct activities

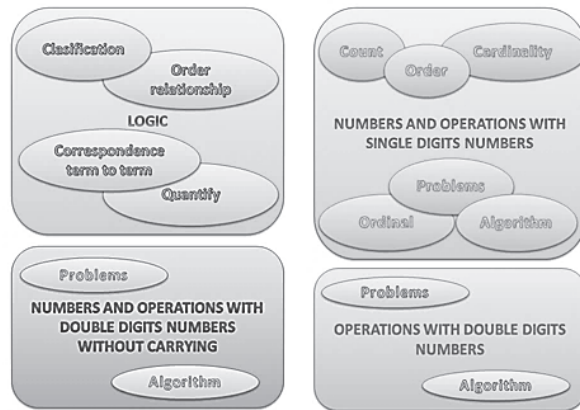


Figure 2. Activity categories in EMATIC.  
Source: The authors.

strategies (*tutor module*). These strategies may include very different behaviors such as: free navigation through activities, fixed sequences, conditional sequences and gamifications. Furthermore, teachers can manage users, groups and activities through the *management module*, and the students can complete their activities using the execution module. Finally, results may be explored using the *visualization module*. Individual record visualizations are especially suited to the use of students, parents or tutors and teachers. The visualization and analysis of aggregated group results may be accessed by teachers and education directors.

### 3.1. Domain Model's Module

This domain model's module contains subject knowledge and the rules and relations among its concepts. The tutor module can obtain the knowledge to be imparted from this module.

The EMATIC domain is made up from the concepts of logic, numbers and operations with single and double digit numbers, problems and addition and subtraction algorithms. Relating to these concepts, there are 10 different types of activities categories (classification, relationships, mapping, quantifiers, counting, recognition, cardinality, ordering, ordinality and problems) [35] and more than 150 task templates (Fig. 2).

### 3.2. Student Model's Module

The student model stores all the information on the pupil (knowledge, preferences, learning styles, etc.) It is composed by the student profile (persistent information such as cognitive age or disability) and the student's records (collected data through the interaction with the system). EMATIC software facilitates the processing of interaction data for cognitive reasoning tracing of the child during the undertaking of a task or set of tasks. So, based on the domain model, the student model is responsible for the generation of the student knowledge state.

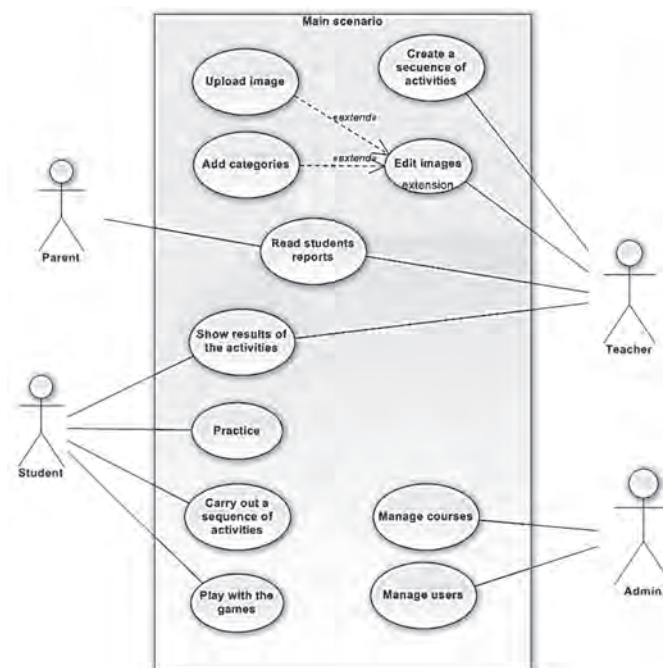


Figure 1. Use case diagram of the EMATIC scenario.  
Source: The authors.

### 3.3. Authoring Module

A setting up of the activities is possible in order to limit randomness when creating personalized exercises and group exercises for the students. The setting up of an activity depends on the particular definition of a type of activity in the system (classification, ordering, relations, etc.). Teachers can record a custom audio for the instruction in order to replace the “Text To Speech Agent” (TTS). They can also set up the maximum time for testing and the maximum number of attempts to pass the activity. Moreover, teachers can choose and replace the picture’s collections to be used in the activity, selecting the most suitable for each type of activity.

### 3.4. Tutor Module

The tutor module contains knowledge about teaching strategies in order to adapt the strategy, taking into account the student module information (knowledge state and profile). Thus, the student model delivers the style which best suits the user, then the tutor module selects the most suitable pedagogical style according to the particular characteristics of each student. Moreover, this module has the gaming mechanics of the systems.

### 3.5. Management Module

In the management module, teachers can create and manage their students and their groups by assigning particular characteristics to students. Teachers may be in charge of several groups, for example, they can have different students in diverse institutions. Besides, teachers can assign the student’s group with a new activity setting.

### 3.6. Execution Module

Typical systems only record the final results of the activities and save them. After, they analyze the interactions made during the resolution of a given task. EMATIC stores all data on user interaction, which is recorded “step-by-step” by the system in order to determine and infer the child’s reasoning during the task execution.

Each exercise evaluates some cognitive ability. These exercises are randomly generated based on the collections and images loaded into the database. When a student selects an exercise, it is generated and then shown to the student. When the student responses, it is stored in the database with specific data (images that show collections relate, etc.) This defines the features that are shown to the student.

The results of the session are compiled and interpreted by the tutor module. The result obtained is the knowledge (or not) of the subjects taught. This also updates the goals that need to be fulfilled in the session.

### 3.7. Visualization Module

EMATIC includes a data visualization module, which provides a specialist tool to discover patterns in certain learning difficulties as a result of data mining. Moreover, teachers can analyze different groups of students with the

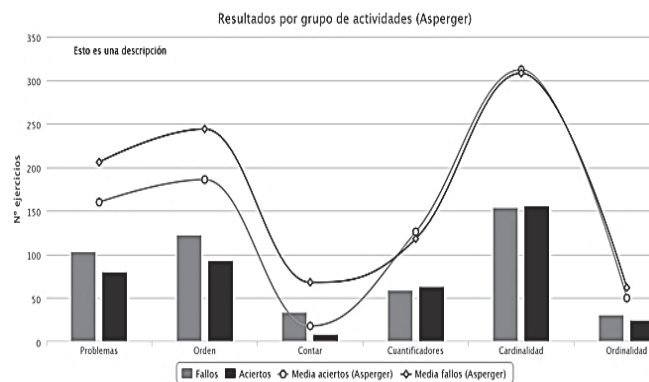


Figure 3. Results by activity group (features).  
Source: The authors.



Figure 4. EMATIC welcome interface.  
Source: The authors.

same problem (for example, Asperger) (Fig. 3). Students can also see their results through the visualization module, but with a specific adaptation to their profiles.

## 4. Evaluation

The EMATIC interfaces have been designed based on usability standards for both a mobile device (such as a tablet) and a desktop computer (Fig. 4). This allows for interaction with visual elements using mouse and touch on the tablet. However, we consider that is necessary to endeavor to overcome the problems faced by SEN children (such as language problems, difficulty in with transference and consolidation of learning and final motor skills problems).

As has been stated above, the seven principles proposed by the Centre for Universal Design at North Carolina State University (1997) have also been considered [31].

Researchers and designers’ experiences are very different to those of SEN users, which make it difficult to identify with or relate to these users. Involving people with impairments in the design process is very challenging, especially when these impairments affect cognitive functions or communication. In order to achieve the set research goals, the participatory design (PD) approach [36] was used. The study involved a group of experts in mathematics, psychologists and teachers from University of La Laguna. Different kinds of techniques

Table 1.  
Example of the “persona” template used in the validation.

| Character                                                                                                                       |                                                                                                        |  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Name                                                                                                                            | Luciana                                                                                                |                                                                                   |
| Age                                                                                                                             | 16                                                                                                     |                                                                                   |
| Gender                                                                                                                          | Female                                                                                                 |                                                                                   |
| Education Level                                                                                                                 | Childhood Education (1 <sup>st</sup> level)                                                            |                                                                                   |
| Context                                                                                                                         |                                                                                                        |                                                                                   |
| When?                                                                                                                           | She uses the computer from Monday to Friday, (30 minutes per session)                                  |                                                                                   |
| Where?                                                                                                                          | 1.1 Tenerife Down Association                                                                          |                                                                                   |
| With who?                                                                                                                       | She uses the computer as a support her classes in the company of her teacher and classmates.           |                                                                                   |
| Mission                                                                                                                         |                                                                                                        |                                                                                   |
| Goals                                                                                                                           | <i>General goal:</i> To develop her reasoning and to use this to solve problems in her daily life.     |                                                                                   |
|                                                                                                                                 | <i>Specific goals:</i>                                                                                 |                                                                                   |
|                                                                                                                                 | a) To develop her levels of perception.                                                                |                                                                                   |
|                                                                                                                                 | b) To develop concepts of quantity.                                                                    |                                                                                   |
|                                                                                                                                 | c) To develop logical thinking.                                                                        |                                                                                   |
|                                                                                                                                 | d) To know the basic vocabulary of mathematical expressions.                                           |                                                                                   |
|                                                                                                                                 | e) To develop her knowledge of and use of calculation (addition and subtraction) in simple operations. |                                                                                   |
| Description                                                                                                                     |                                                                                                        |                                                                                   |
| Luciana is 16 and has Down syndrome (moderate), she has been integrated into school and she is currently in an adult classroom. |                                                                                                        |                                                                                   |
| Quantitative data that can help determine Luciana’s development:                                                                |                                                                                                        |                                                                                   |
| -Mental Age: approximately, 6 years                                                                                             |                                                                                                        |                                                                                   |
| -Verbal-Score: 37                                                                                                               |                                                                                                        |                                                                                   |
| -Manipulative-Score: 43                                                                                                         |                                                                                                        |                                                                                   |
| -IQ-55 (according to her chronological age)                                                                                     |                                                                                                        |                                                                                   |

Source: The authors.

were conducted with experts: persona [14,15, 37] (Table 1), prototype testing and interactive redesign and usability evaluation [39].

The tests were used to complement each other. The topics for testing were adapted from the 11 usability heuristics, with there being more than one hundred items to evaluate the user interface design (Nielsen [27] and Pierotti [39]).

We also conducted a focus group with experts, combining this with the persona technique [14, 15] in order to analyze the weaknesses and straightness of the interface, taking into consideration a user profile.

## 5. Results

The heuristics evaluated were the following:

1. The visibility of system status
2. Matches between systems and the real world
3. User control and freedom
4. Consistency and standards
5. Error prevention
6. Recognition rather than recall
7. Flexibility and efficiency of use
8. Aesthetic and minimalist design
9. Helping users recognize, diagnose and recover from errors

Table 2.  
Heuristics evaluated

| Heuristic /      | 1 %  | 2 %   | 3 %   | 4 %   | 5 %   | 6 %   | 7 %   | 8 %   | 9 %   | 10 %  | 11 %  |
|------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Severity Ranking |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 1                | 61,4 | 70,83 | 47,92 | 66,67 | 59,26 | 62,50 | 69,70 | 50    | 72,22 | 54,17 | 43,02 |
| 2                | 0    | 8,33  | 6,25  | 14,29 | 3,70  | 4,17  | 10,61 | 8,33  | 0     | 12,50 | 29,01 |
| 3                | 7,89 | 8,33  | 6,25  | 2,38  | 3,70  | 20,83 | 10,61 | 0     | 5,56  | 4,17  | 11,02 |
| 4                | 9,65 | 6,25  | 20,83 | 4,76  | 14,81 | 4,17  | 3,03  | 25,00 | 16,67 | 12,50 | 8,05  |
| 5                | 6,14 | 6,25  | 18,75 | 11,90 | 18,52 | 8,33  | 6,06  | 16,67 | 5,56  | 16,67 | 8,9   |

Source: Adapted from Nielsen and Pierotti [39].

### 10. Help and documentation

#### 11. Skills

Each heuristic was measured according the following severity, numbers becoming increasingly severe (possible answers):

1. No usability problem: “I don’t agree that this is a usability problem”
- 2 - Cosmetic problem: “I think it’s an esthetical usability problem”
- 3 - Minor usability problem: “I think it’s a low usability problem”
- 4 - Major usability problem; important to fix: “I think it’s a high usability problem”
- 5 - Usability catastrophe; imperative to fix: “I think it’s a catastrophically usability problem”

The results of heuristic evaluation are shown in Table 2.

The system should inform users of system status, giving appropriate feedback within a reasonable timeframe. More than half of responders (61%) think that there is no usability problem, but other people think that there is an esthetical problem (15%). A catastrophic usability problem is lower than the other options (6%).

In relation to language, the system must use the language that users are familiar with, words or phrases that are known, rather than the terms that are used in the system, so that the user does not find it difficult to use the system. Most responders (71%) think that there is no problem with this usability issue.

When users choose an option from the system by mistake, the system should have the undo and redo options to provide users with an easy way out without them having to use extended dialogue. This is an important aspect to improve in EMATIC, which has a 19% critical usability problem and 21% of high usability problem.

Consistency is a fundamental design principle for usable user interfaces. It dictates that users should follow general rules and conventions in the system. Regarding this issue, however, the results show a low usability problem (67%). However, a catastrophically usability problem is moderately significant with 12%.

Error messages should be expressed in plain language, precisely indicate the problem and be constructive. On this issue, while the 59% of experts think that this is not a usability problem, 33% of respondents were found to have answered to have found it to be between a catastrophically and high usability problem.

Even better than good error messages is a careful design that prevents a problem from occurring in the first place. In

this usability heuristic we found that 63% do not think that it is a usability problem; however, 12% think that it is high or extreme usability problem. So, a careful design is needed to prevent problems before they occur.

The system should minimize the amount of information that the user must remember. Instructions to use the system should be visible or accessible to the user when required. EMATIC has made significant effort in this area, as the results show (70% of experts do not think that it is a usability problem).

Regarding the user efficiency and flexibility heuristic, it is important that the system allows itself to be customized. The results show us much more needs to be done on this issue (42% claim a high and extreme usability problem).

Design is much more than making something look pretty. Studies have shown that designs that look good have a higher probability of being used, and users also perceive that the system is easier to use [40]. The interface should not contain information that is not relevant or is rarely used, because each additional unit of information in a dialogue competes with the relevant units of information and diminishes their relative visibility. For this reason, we believe that the results obtained are positive (72% do not think that it is a usability problem).

The help and documentation of the system has to be easy to find, and focused on user tasks. 29% of experts think that this heuristic is a high or extreme usability problem. Therefore it is an important issue to improve in the next version of EMATIC.

To conclude, we analyzed the skills necessary to be able to fully use system. It is important to remember that the following data must be contextualized in a Down syndrome environment. Within this condition we have found the highest usability problems (57%). At the same time, this issue is a major challenge for the EMATIC system: to create a usable, accessible and adaptive system for the Down syndrome profile, taking into account their limitations and skills.

Moreover, as result of the focus group, the weaknesses of the interface that were detected by experts are the following:

- The interface is not available for people with hearing or visual disabilities, and this is a high usability problem.
- The randomness in the creation of activities causes several problems, for example: drawings of activities that cannot be understood or distinguished from the background, and exercises that have no logical pictures or semantic sense. Sometimes the interface is highly charged with objects, and on other occasions there are only a few objects.
- There is little accuracy when objects are being dragged and dropped in an area.
- It is necessary to give aural feedback along with the results of exercises.
- A more expressive virtual agent is needed.
- Sometimes the computer energy saver interrupts the activity.
- The tablet keyboard is complex to enter text answers (in our case, it is needed only for login).
- Regarding the skills needed to work with the tablet, the experts think that it could be difficult for people with SEN to work autonomously.
- It is easy to exit the program unintentionally.
- If the user makes a mistake it is not corrected.

Experts commented on the following issues being strengths:

- It is excellent to have specific support for tablets.
- It could be a highly motivating tool if applied properly.
- The advantage of the touch device is that it is a more intuitive interface for children or people with disabilities.
- The customization of the user interface and its adaptation to different levels and abilities are good features of EMATIC.

Another important issue that experts suggested was about the menus. They should be shown through pictures, not text-based and the access to the system should be through avatars related to each user.

## 6. Conclusions

In this paper we presented a software development approach based on agile human centered methodologies (SCRUM, UCD, UXD and Lean UX). Also, we focused on the usability analysis and human factors that influence the interface design.

Usability is an issue that is becoming increasingly important in software development. In the current environment, in which software systems are aimed at a special audience (SEN children) and increasingly at experts in a management system, usability is a fundamental attribute that dictates the success of a software application.

For this reason, it is important to invest in usability to build the system. It is very usual to find serious usability errors when the project is about to end, and then time may have to be extended in order to correct such problems. Once it is known how the user interacted with the system, and thus why the problems occurred, we can endeavor to improve the phase.

The most important usability problems found were about user control and freedom, user support and error recovery and skills needed to use the application. Moreover, our best findings were related with and esthetical, minimalist design and user language.

Currently, EMATIC is correcting the different bugs reported that affect flexibility and efficiency, design, support, languages and sounds, consistence, error prevention, etc. in order to meet special users and professional's expectations who interact with it.

Future work will look at the validation of the system in different areas of SEN children, having already improved the software.

## Acknowledgments

We would like to thank the experts in the fields of Didactics of Mathematics and Psychology who have participated in this study. We are especially very grateful to the Tenerife Downs Association for their support and collaboration with our research.

## References

- [1] Cecil, R., Clash of the titans: Agile and UCD. UXmatters [Online] 2006. Available at: <http://www.uxmatters.com/mt/archives/2006/12/crash-of-the-titans-agile-and-ucd.php>.

- [2] Colfelt, A., Bringing user centered design to the agile environment boxes and arrows. [Online] 2010. Available at: <http://www.bboxesandarrows.com/view/bringing-user>.
- [3] Martin, R.C., Agile software development: Principles, patterns and practices. Pearson Education, 2002. ISBN 0-13-597444-5.
- [4] Memmel, T., Gundelsweiler, F. and Reiterer, H., Agile human-centered software engineering. Proceedings of the 21<sup>st</sup> British HCI Group Annual Conference on People and Computers, 1. pp. 167-175, 2007.
- [5] Gothelf, J. and Seiden, J., Lean UX: Applying lean principles to improve user experience. O'Reilly Media, Inc., Sebastopol, CA, 2013.
- [6] Takeuchi, H. and Nonaka, I., The new product development game. Harvard Business Review, 1986.
- [7] Beck, K., Extreme programming explained: Embrace change. Addison-Wesley Professional, 1999.
- [8] Neil, C.J. and Laplante, P.A., Paying down design debt with strategic refactoring. Computer, 39 (12), pp. 131-134, 2006. DOI: 10.1109/MC.2006.435
- [9] Smite, D., Moe, N.B. and Gerfalk, P.R.J., Agility across time and space: Implementing agile methods in global software projects. Springer Publishing Company, 2010. DOI: 10.1007/978-3-642-12442-6
- [10] Detweiler, M., Managing UCD within agile projects. ACM Interactions, 14 (3), pp. 40-42, 2007. DOI: 10.1145/1242421.1242447
- [11] Armitage, J., Are agile methods good for design?. ACM Interactions, 11 (1), pp. 14-23, 2004. DOI: 10.1145/962342.962352
- [12] Mcinerney, P., UCD in agile projects: Dream team or odd couple?. ACM Interactions, 12 (6), pp. 19-23, 2005. DOI: 10.1145/1096554.1096556
- [13] Sy, D., Adapting usability investigations for agile user-centered design. Journal of Usability Studies, 2 (3), pp 112-132, 2007.
- [14] Grudin, J. and Pruitt, J., Personas, participatory design and product development: An infrastructure for engagement. Proceedings of PDC, pp. 144-161, 2002.
- [15] Pruitt, J. and Grudin, J., Personas: practice and theory. Proceedings of Conference on Designing for User Experiences (DUX2003), ACM Press, pp 1-15, 2003. DOI: 10.1145/997078.997089
- [16] Liikkanen, L., Kilpiö, H., Svan, L. and Hiltunen, M., Lean UX - The next generation of user-centered agile?, Proceedings of the 8<sup>th</sup> Nordic Conference on Human-Computer Interaction (NordiCHI '14). ACM, pp. 1095-1100, 2014.
- [17] Schwaber, K., Agile project management with SCRUM. Microsoft Press, 2009.
- [18] Nielsen, J., Agile development projects and usability, Nielsen Norman Group, [Online] 2008. [date of reference February 25<sup>th</sup> of 2014] Available at: <http://www.useit.com/alertbox/agile-methods.html>.
- [19] Nielsen, J., Agile user experience projects. Nielsen Norman Group. [Online] 2009. [date of reference February 25<sup>th</sup> of 2014] Available at: <http://www.useit.com/alertbox/agile-user-experience.html>.
- [20] Nielsen-Norman Group. Report agile usability: Best practices for user experience on agile development projects, Nielsen Norman Group 2<sup>nd</sup> edition. [Online] 2008. [date of reference Feb 25<sup>th</sup> of 2014] Available at: <http://www.nngroup.com/reports/agile/>.
- [21] Garreta, M. and Santanach, F., Open to the users' needs: Combining user-centered design, standards and open source software. Proceedings of open ED Conference, [Online] 2010. [date of reference Feb 25<sup>th</sup> of 2014] Available at: <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/handle/10609/4865>.
- [22] ISO 13407:1999. Human-centred design processes for interactive systems. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1999.
- [23] Abras, C., Maloney-Krichmar, D. and Preece, J., User-centered design. Berkshire encyclopedia of human-computer interaction. Thousand Oaks: Sage Publications, pp. 763-767, 2004.
- [24] Roto, V., Law, E., Vermeeren, A. and Hoonhout, J., User experience white paper. Bringing clarity to the concept of user experience. [Online] 2011. [date of reference February 12<sup>th</sup> of 2014] Available at: <http://www.allaboutux.org/files/UX-WhitePaper.pdf>.
- [25] Larsen, J.M., Evaluating user experience – how game reviewers do it. Workshop on evaluating user experiences in games, at the 2008 Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '08). 2008.
- [26] Constantine, L. and Lockwood, L.A.D., Usage-centered engineering for web applications. IEEE Software, 19 (2), pp. 42-50, 2002. DOI: 10.1109/52.991331
- [27] Nielsen, J. and Mack, R.L. (Eds.), Usability inspection methods. John Wiley & Sons, New York, NY, 1994. DOI: 10.1145/259963.260531
- [28] Stephanidis C. (Ed.) User interfaces for all – concepts, methods and tools. Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah, NJ, 2001.
- [29] Nielsen, J., Alternative interfaces for accessibility. [Online] 2003. [date of reference February 25<sup>th</sup> of 2014] Available at: <http://www.useit.com/alertbox/20030407.html>.
- [30] Lazar, J. (Ed.), Universal usability: Designing computer interfaces for diverse user populations. John Wiley & Sons, 2007.
- [31] Center for universal design. Guidelines for use of the principles of universal design. [Online] 2002. [date of reference February 25<sup>th</sup> of 2014]. Available at: [http://www.ncsu.edu/www/ncsu/design/sod5/cud/about\\_ud/udprinciples.htm](http://www.ncsu.edu/www/ncsu/design/sod5/cud/about_ud/udprinciples.htm).
- [32] Roberts, G.H., The failure strategies of third grade arithmetic's pupils. The Arithmetic Teacher 15 (5), pp. 442-446, 1968.
- [33] Cox, L.S., Systematic errors in the four algorithms in normal and handicapped populations. Journal for Research in Mathematics Education, 6 (4), pp. 202-220, 1975. DOI: 10.2307/748696
- [34] Muñoz, V., Diseño e implementación de planificadores instruccionales en sistemas tutoriales inteligentes mediante el uso combinado de metodologías borrosa y multiagente. PhD. Thesis dissertation, Department of Computer Science, University of La Laguna, Spain, 2007.
- [35] González-González C., Noda, A., Bruno, A., Moreno, L., Muñoz, V., Learning subtraction and addition through digital boards: A down syndrome case. International Journal Universal Access in the Information Society - UAIS, 29 pp. 29-44, 2013. DOI 10.1007/s10209-013-0330-3
- [36] Muller, M.J., Participatory design: The third space in HCI. In Jacko, J. and Sears, A. (eds.), Handbook of HCI 2nd Edition. Mahway, NJ, USA: Erlbaum, 2007, pp. 1051-1068. DOI: 10.1201/9781410615862.ch54
- [37] Nielsen, L., Engaging personas and narrative scenarios: A study on how user-centered approach influenced the perception of the design process in the e-business group at Astra Zeneca, København: Samfundslitteratur, 2004.
- [38] Dow, S., Fortuna, J., Schwartz, D., Altringer, B., Schwartz, B. and Klemmer, S., Prototyping dynamics: Sharing multiple designs improves exploration, group rapport and results. ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'11), pp. 2807-2816. 2011. DOI: 10.1145/1978942.1979359
- [39] Pierotti, D., Heuristic evaluation, a system checklist, Xerox Corporation. [Online] 1995. [date of reference March 18<sup>th</sup> of 2014]. Available at: <http://www.stcsig.org/usability/topics/articles/he-checklist.html>
- [40] Lidwell, W., Butler, J. and Holden, K., Universal principles of design. Beverly, MA: Rockport Publishers. 2003.

**C.S. González-González**, received her PhD. in Computer Science in 2001 from the University of La Laguna, Spain. She is an associated professor in the Computer Engineering Department at the University of La Laguna, Spain. Her main research focus areas are related to human computer interaction (HCI), natural and adaptive interfaces, serious games and gamification in Education and gender in HCI. Also, she has a great experience in e-learning best practices and LMS systems.

**P. Toledo-Delgado**, received his MSc. in Computer Science Engineering from the University of La Laguna, Spain in 2004. He has been a PhD. student at the same university since 2004, in the Computer Engineering Department. His current research interests include Reinforcement Learning, Graph Mining, and Workflow Induction.

**V. Muñoz-Cruz**, received her MSc. in Computer Science in 2001 and her PhD. in Computer Science in 2007 from the University of La Laguna, Spain. She is a professor in the Computer Engineering Department of the University of La Laguna, Canary Islands, Spain. Her current research interests are decision-making, discrete event simulation, intelligent agents, intelligent tutorial systems and computer education.

# Prediction of take-over time in highly automated driving by two psychometric tests

Moritz Körber <sup>a</sup>, Thomas Weißgerber <sup>a</sup>, Luis Kalb <sup>a</sup>, Christoph Blaschke <sup>b</sup> & Mehdi Farid <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Institute of Ergonomics, Technische Universität München, Garching, Germany. {koerber, weissgerber, kalb}@ife.mw.tum.de

<sup>b</sup> BMW Group {christoph.blaschke, mehdi.farid}@bmw.de

Received: February 18<sup>th</sup>, 2015. Received in revised form: March 16<sup>th</sup>, 2015. Accepted: September 29<sup>th</sup>, 2015

## Abstract

In this study, we investigated if the driver's ability to take over vehicle control when being engaged in a secondary task (Surrogate Reference Task) can be predicted by a subject's multitasking ability and reaction time. 23 participants performed a multitasking test and a simple response task and then drove for about 38 min highly automated on a highway and encountered five take-over situations. Data analysis revealed significant correlations between the multitasking performance and take-over time as well as gaze distributions for Situations 1 and 2, even when reaction time was controlled. This correlation diminished beginning with Situation 3, but a stable difference between the worst multitaskers and the best multitaskers persisted. Reaction time was not a significant predictor in any situation. The results can be seen as evidence for stable individual differences in dual task situations regarding automated driving, but they also highlight effects associated with the experience of a take-over situation.

**Keywords:** Automated driving; out of the loop; dual task; multitasking; reaction time; take over time.

# Predicción de control sobre el tiempo en conducción altamente automatizada en dos tests psicométricos

## Resumen

En este estudio se investigó la capacidad del conductor para tomar el control del vehículo, en una tarea secundaria puede predecirse por la habilidad multitarea del sujeto y la reacción inmediata. Participaron 23 personas ejecutando una prueba de tareas múltiples y una de simple respuesta, conduciendo durante 38 min de forma altamente automatizada, encontrándose cinco situaciones de toma de posesión. Los datos revelaron una correlación significativa entre el rendimiento multitarea y la toma del tiempo, así como la distribución de la situación 1 y 2, aunque el tiempo de reacción se controló. Esta relación disminuye comenzando con la situación 3, persistiendo una diferencia estable en la toma en el tiempo entre los peores y los mejores. El tiempo de reacción no fue un predictor significativo. Los resultados pueden ser vistos como evidencia de las diferencias individuales estables en situaciones de doble tarea respecto a la conducción automática.

**Palabras clave:** Conducción automática, tareas duales, multitarea, tiempo de reacción, toma de tiempo.

## 1. Introduction

### 1.1. Automation Effects in Vehicle Control

Technological progress in advanced driver assistance systems (ADAS; [9]) is currently initiating a shift in vehicle control from manual driving to automated driving since current sensory technology and data processing now provide the ability to allow longitudinal control as well as lateral

control be carried out by an automation [13]. In this case, the driver is completely removed from the task of driving in such a way that, in contrast to manual driving, a vehicle automation system fully operates the vehicle. This change in vehicle control is accompanied by a change in the driver's tasks and the resulting task demands. Firstly, in case of partial automation ([11]; level 2 in [27]), the driver has to constantly monitor the automation, i.e. the active role of driving is replaced with a passive role as a monitor. Secondly, if a

system limit or failure occurs, the driver has to switch from passive automated control to manually steering the vehicle. Thirdly, the automation provides the driver with the ability to engage in non-driving-related activities since vehicle control is carried out by the automation. As a result, the driver now has to switch between two tasks if he needs to regain control of the vehicle. The goals of introducing vehicle automation are to reduce the driver's workload [34] and to increase traffic safety [22,29] and comfort [35]. Since possible problems in the interaction between human and automation have already been found in other fields, such as aviation [28,39], it is necessary to review not only the technological but also the human aspect of safety. Issues associated with human-automation interaction are subsumed under the term *automation effect*. According to our definition, this is:

*an effect that is caused by the difference in demands and tasks of the operator between automation and manual operation and is detrimental to the operator's capability to perform.*

### 1.2. The Out-of-the-loop state as a Consequence of Automated Vehicle Control

Vehicle control can be seen as an interaction between human, machine and environment [21] and, therefore, the paradigm of a feedback loop of a human-machine system is applicable [3,33]. The driving task represents the input parameter and the set point is represented by the target speed and route. Vehicle movement is the resultant output parameter. The driver acts as a controller of the loop in order to minimize the discrepancy between actual and target speed or route. To successfully undertake this controller task, the driver has to continuously observe the environment, traffic and his own vehicle movement. This loop is shown in Fig. 1.

In case of an automated drive, the vehicle automation takes over the task of the controller so that the driver is taken out of the (feedback) loop. Negative consequences of this state are subsumed under the term *out-of-the-loop* [8] state. We define *out-of-the-loop* as:

*a driver state of readiness in which the driver is not able to immediately intervene in the feedback loop comprised of controller and vehicle. In this state, the driver does not have up-to-date knowledge of the parameters that are relevant for the controlling task, e.g. his own speed, position, or a headway vehicle. He is also not able to predict the situation insofar as to create a time window for himself that is long enough to react to events in a manner that is safe for road traffic.*

The state is not binary but a continuous dimension with in-the-loop and out-of-the-loop as poles. Therefore, drivers can be out-of-the-loop to varied extents. The consequences of this state are longer reaction times [24,36], omission of a reaction [7], or errors in information collection [2]. A high out-of-the-loop state can be reached as a result of different causes, but increased engagement in a secondary activity as a behavioral adaption to automation is the automation effect with the strongest link to it. Contrary to manual driving, where the driver's attention on the road is constantly required, automated driving allows the driver to engage in other activities, such as reading the newspaper or playing a video game. Marras [23] considers boredom that arises during a drive to be a consequence of not undertaking the driving task, which could lead to increased engagement in secondary activities. Accordingly, Carsten and Colleagues [6] found that the engagement in a secondary activity increases as the level of automation rises. As a consequence, the driver allocates at least a part of his attention to a non-driving-related task and no longer completes the aforementioned task of updating the relevant situation parameters and therefore reaches, to a certain degree, the out-of-the-loop state.

### 1.3. Evidence for Individual Differences

In their literature review, Körber and Bengler [19] point out that potential inter-individual differences could exist in automation effects and imply that they should be taken into account in sampling and should be investigated in empirical studies. In order to keep the out-of-the-loop-state low, the driver has to have the ability to constantly update the relevant parameters for driving safety (e.g. road, other traffic, his own movement), while being engaged in a secondary task at the same time. This ability can be seen as an application of the construct *multitasking ability*: the ability to work on two tasks at the same time. Previous research has revealed evidence for stable individual differences in multitasking: Bühner and colleagues [5] found that working memory performance was the best predictor of multitasking, ahead of reasoning and attention. Accordingly, Morgan and colleagues [25] also found working memory and scholastic aptitude to be significant predictors of multitasking in a flight simulation. Working memory load also induces an attentional blindness [10] and could therefore be detrimental in terms of detecting hazards in traffic while driving. Kahneman, Ben-Ishai, and Lotan [17] were able to link the ability to relocate attention with a driver's accident history as lower performance was associated with higher accident frequency. Alzahabi and

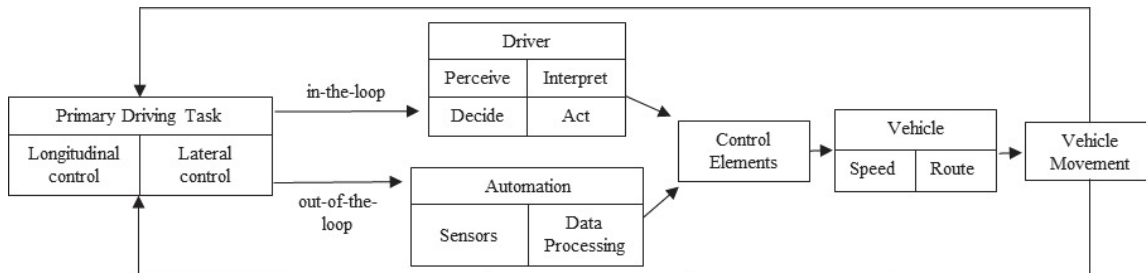


Figure 1.  
Model of driver-vehicle feedback loop  
Source: created by the authors; adapted from Bubb [4].

Becker [1] split their participants into light and heavy multitaskers based on their frequency of engaging in two media activities at the same time. Although no difference was found with regard to working on two tasks simultaneously, heavy multitaskers were more capable of switching between two tasks. Beyond this, Watson and Strayer [38] found no performance decrement in a difficult dual task setting for 2.5% of their participants, who they named *supertaskers*. This evidence suggests that drivers vary in their multitasking abilities and thus differ in their potential to reach a critical out-of-the-loop state by engaging in a secondary task. Since the out-of-the-loop state lead to longer reaction times, we therefore expect that the ability to multitask is directly related to the time needed to take over an automated vehicle.

H1: The performance in a multitasking test is negatively correlated to take-over time.

In their work, Körber and Bengler [19] list the *individual reaction time* as another factor influencing take-over time. This seems intuitive as, since even if the driving task is carried out by the vehicle automation, the driver is required to quickly take back control as a response to a take-over request (TOR; e.g. an earcon) by the vehicle if the automation reaches a system limit or fails. We therefore predict the following relationship:

H2: The individual reaction time is positively correlated to take-over time.

Since we expect two different mechanisms in relationship to take over time, we assume that both multitasking and individual reaction times have independent unique influences on it. Therefore, we predict the following relationship:

H3: The performance in a multitasking test and the individual reaction time are in an independent relationship with take-over time.

## 2. Method

### 2.1. Sample

Originally, 30 participants were recruited through a written announcement. Due to data logging problems, 7 participants had to be excluded, leaving the sample size for data analysis at  $n = 23$ , comprised of 13 (56.5 %) males and 10 (43.5 %) females. The mean age was  $M = 34.7$  ( $SD = 13.27$ ), with a range of 21–59 years. Of all participants, 11 (47.83 %) were students, 3 (13.04 %) were research assistants and 9 (39.13 %) were employed. All participants had held a driving license for a minimum of 4 years, with a mean of  $M = 16.70$  years ( $SD = 12.51$ ). The subjects reported to have driven  $M = 20304.34$  km ( $SD = 21274.04$ ) over the last year. They rated their experience with driver assistance systems on a 5-point Likert-scale with a mean of  $M = 3.35$  ( $SD = 0.93$ ). Participation was rewarded with 20 euros.

### 2.2. Measures

#### 2.2.1 Take over time (TOT)

The dependent variable of the experimental design is the take over time (TOT): the point in time a subject consciously

took over control, i.e. either braked or started to steer. This time point is indicated relative to the TOR and, as such, represents the time span before or after the TOR signal. A subject with a TOT of 0 ms has, therefore, taken over exactly at the same moment as the TOR was emitted.

#### 2.2.1. Multitasking Test (MT)

The multitasking test was conducted on two separate monitors, on the left a Fujitsu Siemens P17-1 (screen size: 17") and on the right a Samsung Syncmaster 245B (screen size: 24"). The two monitors were placed on a table at a distance of 60 cm (frame to frame). The subjects sat in seats about 40 cm in front of the monitors, which were set at an angle of 45° to the subject who was facing straight ahead. On the left monitor, the subjects had to perform a reaction time task that is a modified version of the PEBL Perceptual Vigilance Task [18, 26]: A white fixation cross appeared for 400 ms in the center of the screen on a black background. Next, a red dot appeared at random intervals from the set [4, 5, ..., 8] s. Subjects had to respond by pressing the space bar as quickly as possible. Upon pressing the space bar, the dot disappeared and a new trial started.

On the right screen, a version of the PEBL Visual Search Task [37] was used. Subjects had to search for the letter X, which was presented next to a random selection of 10, 20 or 30 distractor letters ("U", "D", "G", "C", "Q"). All letters were written in white color, the background was black. If the subject found the letter, he had to respond with a left click on the mouse. All of the letters shown turned into white circles and participants had to left click on the spot where the target was previously displayed. The resultant measure was the sum of both the reaction time of the left and the right test. Participants had to work at both tasks at the same time for 3 min. The dependent variable was the combined reaction time of both tasks.

#### 2.2.2. Reaction Time Test (SRT)

We used a modified version of the PEBL Simple Response Time (SRT) [30] to measure the individual reaction time. For this task, the Fujitsu Siemens P17-1 monitor was used again. Subjects were presented with a black letter "X" on a grey background at random inter-stimulus intervals from the set [500, 750, 1000, ..., 2500] ms. The required response was to press the "X" key on the keyboard as quickly as possible. Each key stroke started a new trial. Reaction times shorter than 150 ms and longer than 3000 ms were excluded from the analysis. The test was run for 75 trials.

#### 2.2.3. The Secondary Task: Surrogate Reference Task (SuRT)

Driver distraction is often caused by texting with a cell phone, using a navigation system or a media system, all of which can all be subsumed under the "visual-manual" category [15]. To simulate visual-manual distraction we used the *Surrogate Reference Task* (SuRT; a detailed description can be found in [16]). Subjects had to solve this task in the *hard* mode. The task was implemented on a Lenovo ThinkVision LT1421 (screen size: 14") placed atop of the

central information display of the mockup. The subjects input their responses by a special keyboard that only contained the cursor keys. The task is easily interruptible and requires the subject to switch their visual focus between road/environment and the task. In order to motivate the participants to engage in the SuRT, they were told that each solved task would be rewarded with 10 cents, whereas their rewards would be halved if they collide with an obstacle.

#### 2.2.4. Eye Tracking

We recorded each participant's eye movements using the eye tracking system *Dikablis* from Ergoneers GmbH. We set up two areas of interest: one area of interest was the screen of the secondary task, to be referred to as *SuRT*. The other area of interest was the road and the surrounding environment, to be referred to as *road/environment*. The analyzed parameter was the glance location probability.

#### 2.2.5. Driving Simulation Scenario

The study was conducted in a static driving simulator that provided a front field view of approximately 180° and three additional screens for the rear mirrors. The participants drove highly automated, i.e. longitudinal as well as lateral control was carried out by the vehicle automation for about 38 min at a speed of 80 km/h in the middle lane of a six lane highway. The automation could be switched on by pressing a button and off, by steering, or by using the gas pedal or brake. The subject's vehicle was surrounded by 12 other road users driving at varying distances between 40–125 m. Five situations were set up in the simulator track where the participants were requested to take back vehicle control when hearing an acoustic signal. The reasons for take-over situations were obstacles in the middle lane, e.g. three rear-end collision accidents and two cars that had broken down. The view of the obstacles was obstructed by two headway vehicles until the time to collision (TTC) was 10 s. At a TTC of 3 s (66.67 m), the automation signaled that a system limit is reached and that the subject has to take over control. The appropriate reaction in this situation is to slow the vehicle down until two vehicles driving on the left and right lane respectively have passed the subject's vehicle and then to change lanes in order to pass the obstacle. Driving time between the situations was approximately 5 min. The subjects were requested to turn on the automation again and to return to the middle lane after each situation.

#### 2.3. Procedure

After being welcomed by the experimenter, the participants filled out a demographic questionnaire. Next, the subjects were introduced to the SRT and could complete trials until they felt comfortable starting the task. Then, they performed the SRT. Following this, they were introduced to the multitasking test. They could try out both tasks separately until experimenter and subject felt confident in starting the test, at which point the multitasking test was run. Participants then took a seat in the driving simulator and performed an introductory drive that consisted of manual driving, driving

Table 1.  
Results of the two tests.

|     | <i>M</i> | <i>SD</i> | Mean number of errors |
|-----|----------|-----------|-----------------------|
| MT  | 5158.42  | 1092.45   | 2.55                  |
| SRT | 308.26   | 29.72     | 0                     |

Values are represented in ms;  
Source: Authors

Table 2.  
Results of the secondary task SuRT.

|      | Mean number of solved trials | Mean number of errors | Mean RT [ms] |
|------|------------------------------|-----------------------|--------------|
| SuRT | 66.90                        | 0.54                  | 4584.81      |

RT = reaction time; source: authors.  
Source: The authors

with high automation and a take-over situation. After that, subjects could practice the SuRT until they felt comfortable performing it during a drive. The experimental drive then started. The introduction to the experimental drive stated that vehicle control is carried out by the automation if activated, but the responsibility for safe driving still lies with the driver. After the experimental drive was completed, the subjects received their monetary compensation.

### 3. Results

For all statistical tests, a significance level of  $\alpha = .05$  was set. Table 1 shows the results of the multitasking test (MT) and the SRT. To determine the performance in the tests, the mean reaction time was calculated. Table 2 shows the results for the secondary task SuRT. We analyzed the mean number of solved trials, the mean number of errors made and the mean processing time for each trial. Fig. 2 shows the mean TOT in Situations 1–5. There were significant differences between the means of the situations ( $F(4, 88) = 17.15$ ,  $p < .001$ ,  $\eta_p^2 = .44$ ), and the means decreased in a linear manner ( $F(1, 22) = 36.83$ ,  $p < .001$ ,  $\eta_p^2 = .63$ ). We further investigated the significant differences in means by post-hoc tests with adjustment of the significance level following the Bonferroni method. Significant post-hoc tests are also marked in

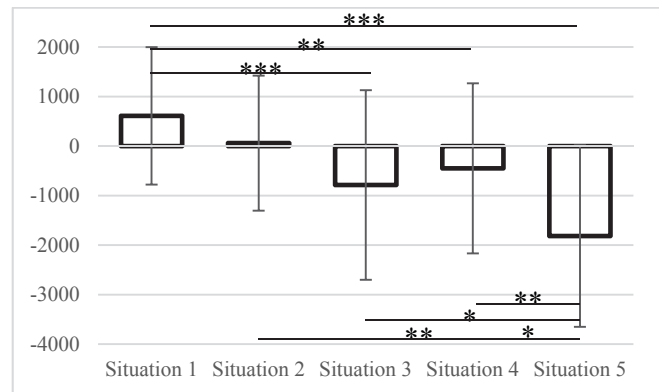


Figure 2.

Mean TOT in every situation in ms; negative TOT indicate a take-over before the TOR signal; bars mark significant results of post-hoc tests with Bonferroni adjustment; \*\*  $p < .01$ , \*\*\*  $p < .001$ ; error bars mark standard deviation;

Source: The authors.

Fig. 2. To test our hypothesis of the unique influence of MT and SRT on the TOT, we conducted a multiple linear regression using the “Enter” method to include predictors. Results of this regression analysis are presented in Table 3. We found significant regression coefficients for the MT in Situation 1 and Situation 2, but not in other Situations. The SRT was not in a significant relationship with the TOT in any situation. Thus, hypothesis H1 was only supported for Situations 1 and 2. Since the SRT was, in no situation, in a significant relationship with the TOT, Hypothesis H2 was not supported by the data. Since the MT was in a significant relationship with the TOT even if the SRT was included in the regression model, hypothesis H3 was supported by data for Situation 1 and 2, but not for other situations.

In order to investigate why the correlation decreases, we divided the subjects into four quartiles based on their multitasking performance and plotted their TOT in the course of the five situations (see Fig.3). The addition of this between factors increased the explained variance of the within factor situation ( $F(4, 76) = 17.47, p < .001, \eta_p^2 = .48$ ), but only a trend for quartile group ( $F(3, 19) = 3.25, p = .09, \eta_p^2 = .15$ ) and no significant interaction effect ( $F(12, 76) = 1.47, p = .16, \eta_p^2 = .19$ ) was found. However, it can be seen that the means of quartile 1–3 converge until Situation 3 and the difference disappears. Nevertheless, although the worst multitaskers also decrease their TOT in the course of the experiment, their means do not converge to the other quartiles and a gap remains. Furthermore, we investigated the relationship between MT results and glance distribution and calculated Pearson’s correlation coefficient (results listed in Table 4). For Situation 1 and 2 we observed medium to large positive correlations with the SuRT and medium to large negative correlations to the road/environment. That means that the worse the performance in the MT was, the more the subjects looked at the secondary task and the less they scanned the road and environment.

Table 3.  
Multiple Regression analysis to predict the TOT by the two pre-tests.

|             |     | $\beta$ | SE    | Beta  | $\Delta R^2$ |
|-------------|-----|---------|-------|-------|--------------|
| Situation 1 | MT  | 0.60    | 0.25  | .47*  | .24°         |
|             | SRT | 3.23    | 9.19  | .07   |              |
| Situation 2 | MT  | 0.76    | 0.22  | .61** | .40*         |
|             | SRT | 4.78    | 8.00  | .10   |              |
| Situation 3 | MT  | 0.54    | 0.36  | .31   | .15          |
|             | SRT | 12.86   | 13.39 | .20   |              |
| Situation 4 | MT  | 0.38    | 0.33  | .24   | .13          |
|             | SRT | 14.14   | 12.10 | .25   |              |
| Situation 5 | MT  | .45     | 0.36  | .27   | .08          |
|             | SRT | -7.46   | 13.34 | -.12  |              |

\*\*  $p < .01$ , \*  $p < .05$ , °  $p < .10$ ; Source: authors.

Source: The authors

Table 4.  
Correlation between MT and glance location probability on secondary task or road/environment. Source: authors.

|             | SuRT  | road/environment |
|-------------|-------|------------------|
| Situation 1 | .37*  | -.40*            |
| Situation 2 | .54** | -.54**           |
| Situation 3 | .33   | -.33             |
| Situation 4 | .25   | -.23             |
| Situation 5 | .26   | -.29             |

\* =  $p < .05$ ; \*\* =  $p < .01$ ;

Source: the authors.

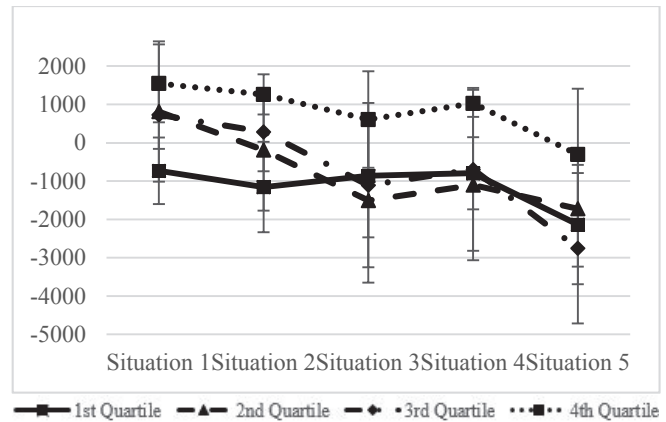


Figure 3.

TOT of the four quartiles in ms; error bar = standard deviation;

Source: The authors.

For the othersituations the same trend was found, but the correlations were not significant. The correlations decreased linearly from Situation 2 to Situation 5 for both AOIs.

#### 4. Discussion

The aim of this study was to investigate if take over time can be uniquely predicted by performance in a multitasking test and in a reaction time test.

The take-over time decreased linearly with every take over situation (except for Situation 4). Hence, the participants learned how to cope with the dual task situation and became quicker at switching tasks.

We found a significant relationship between the multitasking test and the take over time, even when we controlled for individual reaction time. The worse the participants performed in this test, the longer was the needed time to take-over Situations 1 and 2. This finding is supported by the eye tracking data: subjects with low multitasking concentrated their gaze more on the secondary task and less on the road and environment. It is conceivable that subjects who have difficulties performing two tasks at the same time alleviated task induced stress by prioritizing one task. However, both relationships diminish in the course of the other three situations. To investigate the reason for this, we divided the subjects into four quartiles regarding their multitasking performance. For quartile 1–3, the 75 % best multitaskers, the mean take-over time converges until Situation 3 and is then on an equal level. It could be possible that the participants in the 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup> quartile either changed their strategy, increased their effort or improved their multitasking skill by learning. Improvement of their multitasking skill seems unreasonable since the 4<sup>th</sup> quartile (the lowest 25 % of performers) also experiences a decrement in take over time, but there remains a gap between the other groups. Quartiles 2 and 3 would, therefore, also have to differ in a covariate that allows them to learn faster than quartile 4. Moreover, the quartiles’ performance is equivalent for the first time in Situation 3, thus it can be seen that it took more than one situation to adapt to the task. The experience of one take-over seems that it should have been enough to adapt the glance strategy. Nevertheless, stable differences in

multitasking ability appear to exist, since quartile 4 also became accommodated to the dual task situation (and therefore the take over time decreases), but never achieve the same performance level that the good multitaskers demonstrate. A subsequent study should clarify the reasons for the differences in performance development.

Individual reaction was in not a significant predictor of take-over time in any situation. The reason for this could lie in the difference in the actions required for the tasks. While the SRT required only a simple button press upon the appearance of a letter, a take-over is more complex, since it requires the driver to relocate their attention to the road, to process and interpret the situation, to choose a reaction, to locate the steering wheel or brake and then to execute a maneuver [12]. Another point of consideration is the low standard deviation of the SRT reaction times. Without an existing variance, no correlation can be found. A more difficult task or a larger sample could have precluded this limitation.

Certainly, the study's conclusions have limitations. The SuRT is a very artificial secondary task that is not very interesting or distracting. Since the task was new to the subjects, they had no practice of it previously, not had they developed strategies as one would expect when using a navigation device. Moreover, the subjects engaged in the task because of the reward and compliance, but in everyday real-life automated driving, the motivation for engagement in other activities is rather intrinsic (e.g. enjoyment of a game). Beyond this, the sample's mean age was quite low. As Körber and Bengler [19] pointed out, the effects of age could be very relevant to a take-over situation. Other researchers have already found difficulties for elderly people in working memory tasks [31], task switching [20], multitasking [14] and prolonged reaction times [32]. These skills are required for a safe engagement in a secondary task. Therefore, elderly people should be investigated as subjects in future studies on take-over times. In addition, secondary tasks with greater external validity such as games or difficult topic conference calls could be used in studies. Inter-individual differences with respect to trust in automation, attention allocation (e.g. complacency) or proneness to boredom in topics that have not yet been well researched in an automotive context should therefore also be considered in further studies.

In conclusion, a multitasking test can predict initial take over time and initial attention allocation when a driver is engaged with a secondary task. This relationship diminishes in the course of the experiment for the majority of participants, possibly due to training or a change in strategy. For the worst multitaskers, a stable difference in take-over time remains throughout every situation and can be seen as evidence for stable individual differences in dual task performance. A reaction time task, however, cannot predict take over time.

## References

[1] Alzahabi, R. and Becker, M.W., The association between media multitasking, task-switching and dual-task performance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 39 (5), pp. 1485-1495, 2013. DOI: 10.1037/a0031208

[2] Barnard, Y. and Lai, F., Spotting sheep in Yorkshire: Using eye-tracking for studying situation awareness in a driving simulator. In

Human factors. A system view of human, technology and organisation, De Waard, D., Axelsson, A., Berglund, M., Peters, B. and Weikert, C., Eds. Shaker Publishing, Maastricht, pp. 249-261. 2010.

[3] Bergmeier, U., Kontaktanalog markierendes nachtsichtsystem. Entwicklung und experimentelle absicherung. Dissertation, Technische Universität München, Deutschland, 2009.

[4] Bubbs, H., Untersuchung über die anzeige des bremsweges im kraftfahrzeug. Dissertation, Technische Universität München, Deutschland, 1975.

[5] Bühner, M., König, C.J., Pick, M. and Krumm, S., Working memory dimensions as differential predictors of the speed and error aspect of multitasking performance. *Human Performance* 19 (3), pp. 253-275, 2006. DOI: 10.1207/s15327043hup1903\_4

[6] Carsten, O., Lai, F.C.H., Barnard, Y., Jamson, A.H. and Merat, N., Control task substitution in semiautomated driving: Does it matter what aspects are automated?, *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 54 (5), pp. 747-761, 2012. DOI: 10.1177/0018720812460246

[7] Damböck, D., Weissgerber, T., Kienle, M. and Bengler, K., Requirements for cooperative vehicle guidance. In 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013), pp. 1656-1661, 2013. DOI: 10.1109/ITSC.2013.6728467. DOI: 10.1109/ITSC.2013.6728467

[8] Endsley, M.R. and Kiris, E.O., The Out-of-the-loop performance problem and level of control in automation. *Human Factors* 37 (2), pp. 381-394, 1995. DOI: 10.1518/001872095779064555

[9] Flemisch, F.O., Bengler, K., Bubbs, H., Winner, H. and Bruder, R., Towards cooperative guidance and control of highly automated vehicles: H-mode and conduct-by-wire. *Ergonomics*, 57 (3), pp. 343-360, 2014. DOI: 10.1080/00140139.2013.869355

[10] Fougner, D. and Marois, R., Executive working memory load induces inattention blindness. *Psychonomic Bulletin & Review*, 14 (1), pp. 142-147, 2007. DOI: 10.3758/BF03194041

[11] Gasser, T.M., Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung. Gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe, F 83, 2012.

[12] Gold, C. and Bengler, K., Taking over control from highly automated vehicles. In Proceedings of the 5th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics AHFE 2014, In Press.

[13] Gold, C., Damböck, D., Lorenz, L. and Bengler, K., "Take over!" How long does it take to get the driver back into the loop? Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting 57 (1), pp. 1938-1942, 2013. DOI: 10.1177/1541931213571433

[14] Hartley, A.A., Age differences in dual-task interference are localized to response-generation processes. *Psychology and Aging* 16 (1), pp. 47-54, 2001. DOI: 10.1037/0882-7974.16.1.47

[15] Horberry, T., Anderson, J., Regan, M.A., Triggs, T.J. and Brown, J., Driver distraction: The effects of concurrent in-vehicle tasks, road environment complexity and age on driving performance. *Accident Analysis & Prevention*, 38 (1), pp. 185-191, 2006. DOI: 10.1037/0882-7974.16.1.47

[16] ISO14198. PD ISO/TS 14198:2012 - Road vehicles - Ergonomic aspects of transport information and control systems - Calibration tasks for methods which assess driver demand due to the use of in-vehicle systems. BSI, 2012.

[17] Kahneman, D., Ben-Ishai, R. and Lotan, M., Relation of a test of attention to road accidents. *Journal of Applied Psychology* 58 (1), pp. 113-115, 1973. DOI: 10.1037/h0035426

[18] Karlen, W., Cardin, S., Thalmann, D. and Floreano, D., Enhancing pilot performance with a SymBodic system. In Annual international conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). IEEE, Piscataway, NJ, pp. 6599-6602, 2010. DOI: 10.1109/IEMBS.2010.5627127. DOI: 10.1109/IEMBS.2010.5627127

[19] Körber, M. and Bengler, K., Potential individual differences regarding automation effects in automated driving. In Interacción '14: Proceedings of the XV International Conference on Human Computer Interaction. ACM, New York, NY, USA, 2014. DOI: 10.1145/2662253.2662275

[20] Kray, J. and Lindenberger, U., Adult age differences in task switching. *Psychology and Aging* 15 (1), pp. 126-147, 2000. DOI: 10.1037/0882-7974.15.1.126

- [21] Lange, C., Wirkung von fahrerassistenz auf der führungsebene in abhängigkeit der modalität und des automatisierungsgrades. Dissertation, Technische Universität München, Deutschland, 2008.
- [22] Makishita, H. and Matsunaga, K., Differences of drivers' reaction times according to age and mental workload. *Accident Analysis & Prevention*, 40 (2), pp. 567-575, 2008. DOI: 10.1016/j.aap.2007.08.012
- [23] Marras, W.S., Bored beyond Belief: How automation is boring us to distraction. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 54<sup>th</sup> annual meeting. HFES 2010, San Francisco, California, USA. Human Factors and Ergonomics Society, Santa Monica, CA, 758, 2010. DOI: 10.1177/154193121005401102.
- [24] Merat, N. and Jamson, A.H., How do drivers behave in a highly automated car. Proceedings of the Fifth International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design, pp. 514-521, 2009.
- [25] Morgan, B., D'Mello, S., Abbott, R., Radvansky, G., Haass, M. and Tamplin, A., Individual differences in multitasking ability and adaptability. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 55 (4), pp. 776-788, 2013. DOI: 10.1177/0018720812470842
- [26] Mueller, S.T. and Piper, B.J., The Psychology experiment building language (PEBL) and PEBL test battery. *Journal of neuroscience methods* 222, pp. 250-259, 2014. DOI: 10.1016/j.jneumeth.2013.10.024
- [27] National Highway Traffic Safety Administration. Preliminary statement of policy concerning automated vehicles, Washington, DC., USA, 2013.
- [28] Norman, D.A., The 'problem' with automation: Inappropriate feedback and interaction, not 'over-automation'. *Philos. Trans. R. Soc. Lond., B, Biol. Sci.* 327 (1241), pp. 585-593, 1990. DOI: 10.1098/rstb.1990.0101
- [29] Recarte, M.A. and Nunes, L.M., Mental workload while driving: Effects on visual search, discrimination and decision making. *Journal of Experimental Psychology: Applied* 9 (2), pp. 119-137, 2003. DOI: 10.1037/1076-898X.9.2.119
- [30] Robinson, M.D. and Tamir, M., Neuroticism as mental noise: a relation between neuroticism and reaction time standard deviations. *J Pers Soc Psychol*, 89 (1), pp. 107-114, 2005. DOI: 10.1037/0022-3514.89.1.107
- [31] Salthouse, T.A., Mediation of adult age differences in cognition by reductions in working memory and speed of processing. *Psychological Science* 2 (3), pp. 179-183, 1991. DOI: 10.1111/j.1467-9280.1991.tb00127.x
- [32] Salthouse, T.A., When does age-related cognitive decline begin? *Neurobiology of Aging* 30 (4), pp. 507-514, 2009. DOI: 10.1016/j.neurobiolaging.2008.09.023
- [33] Schmidtke, H. and Bernotat, R., *Ergonomie*. Hanser, München [u.a.], 1993.
- [34] Stanton, N.A. and Young, M.S., Vehicle automation and driving performance. *Ergonomics* 41 (7), pp. 1014-1028, 1998. DOI: 10.1080/001401398186568
- [35] Stanton, N.A. and Young, M.S., Driver behaviour with adaptive cruise control. *Ergonomics* 48 (10), pp. 1294-1313, 2005. DOI: 10.1080/00140130500252990
- [36] Strand, N., Nilsson, J., Karlsson, I.M. and Nilsson, L., Semi-automated versus highly automated driving in critical situations caused by automation failures. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 27, pp. 218-228, 2014. DOI: 10.1016/j.trf.2014.04.005
- [37] Treisman, A., Preattentive processing in vision. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 31 (2), pp.156-177, 1985. DOI: 10.1016/S0734-189X(85)80004-9
- [38] Watson, J.M. and Strayer, D.L., Supertaskers: Profiles in extraordinary multitasking ability. *Psychonomic Bulletin & Review* 17 (4), pp. 479-485, 2010. DOI: 10.3758/PBR.17.4.479
- [39] Wiener, E.L. and Curry, R.E., Flight-deck automation: Promises and problems. *Ergonomics* 23 (10), pp. 995-1011, 1980. DOI: 10.1080/00140138008924809

**M. Körber**, is a graduate research assistant under Professor Dr. Klaus Bengler at the Institute of Ergonomics at the Technische Universität München. In 2012, he earned his diploma (German equivalent to a Master's degree) in psychology and business at the University of Regensburg. His Thesis topic was "Ethical leadership and its influence on employees' challenging citizenship behavior". After working on several User Experience projects, his primary research interests are vigilance, fatigue, and automation effects on driver attention.  
ORCID: 0000-0002-5839-8643

**T. Weißgerber**, graduated with a diploma in Mechanical Eng. at the Technische Universität München. Since 2011 he has been a graduate research assistant at the Institute of Ergonomics (Professor Dr. Klaus Bengler). His main research interest is automated driving with augmented reality.

**L. Kalb**, is currently studying mechanical engineering at the Technische Universität München. He wrote his BSc. Thesis on an examination of eye tracking and automated driving.

**C. Blaschke**, graduated with a diploma in Psychology at the Philipps Universität Marburg and received a PhD in Eng. at the Universität der Bundeswehr München. Since 2013 he has been working on "Safety in use" at the BMW group.

**M. Farid**, earned his diploma in Electrical Eng. at the Technische Universität München. He has been working on "Safety in use of Highly Automated Driving" at the BMW Group since 2009.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN  
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería  
Eléctrica e Ingeniería de Control

Oferta de Posgrados

Maestría en Ingeniería - Ingeniería Eléctrica

Mayor información:

E-mail: ingelcontro\_med@unal.edu.co  
Teléfono: (57-4) 425 52 64

# Comparing the efficiency of performing complex tasks with a tablet and a smartphone

Federico Botella <sup>a</sup>, Juan P. Moreno <sup>b</sup> & Antonio Peñalver <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Center of Operations Research University Institute, Miguel Hernandez University of Elche, Alicante, Spain, [federico@umh.es](mailto:federico@umh.es), [a.penalver@umh.es](mailto:a.penalver@umh.es)

<sup>b</sup> Statistics, Mathematics and Informatics Department, Miguel Hernandez University of Elche, Alicante, Spain, [juan.morenom@umh.es](mailto:juan.morenom@umh.es)

Received: February 18<sup>th</sup>, 2015. Received in revised form: March 16<sup>th</sup>, 2015. Accepted: September 26<sup>th</sup>, 2015

## Abstract

The number of users who today use a smartphone or a tablet as a tool on a daily basis is increasing. Professionals, in certain environments, are moving towards mobile devices instead of the traditional laptop or desktop computer. From manufacturing to e-health and e-commerce, more and more apps can be used to improve companies' efficiency and efficacy. Thus, there are apps developed for tablet and smartphone platforms as well as for the traditional desktop version. But how can we define user efficiency with each platform? In this work we present a comparative usability study of one CRM app that is designed for all that three platforms (laptop, smartphone, and tablet). We conducted a study with eight participants in which the efficiency of one mobile app designed for iPad and iPhone was measured. Results of the study demonstrate that users are more efficient with a tablet than with a smartphone for undertaking complex tasks.

**Keywords:** mobile usability; screen size; mobile efficiency; mobile effectiveness.

# Comparando la eficiencia al realizar tareas complejas con una tableta frente a un smartphone

## Resumen

El número de usuarios que usan diariamente un smartphone o una tableta como su herramienta de trabajo está aumentando. Muchos profesionales están cambiando sus ordenadores de escritorio o portátiles por dispositivos móviles en ciertos entornos. Desde factorías hasta sectores de e-health o e-commerce, cada vez más aplicaciones móviles están siendo usadas para mejorar la eficacia y eficiencia de las empresas. Así, podemos encontrar apps desarrolladas par tabletas o smartphones además de sus versiones tradicionales de escritorio. Pero, ¿cómo podemos medir la eficiencia de una usuario sobre cada plataforma? En este trabajo presentamos un estudio comparativo de usabilidad sobre una aplicación de gestión CRM diseñada para las tres plataformas. Realizamos un estudio con ocho participantes para medir la eficiencia de una aplicación móvil diseñada para iPad y para iPhone. Los resultados demuestran que los usuarios son más eficientes con una tableta que con un smartphone para realizar tareas complejas.

**Palabras clave:** usabilidad móvil; tamaño pantalla; eficiencia móvil; efectividad móvil.

## 1. Introduction

Mobile phones have been evolving ever since the 1980s and at a faster rate than any other device. The original mobile concept has inspired new devices, which have led to the development of smartphones and tablets, increasingly with touchscreen capabilities.

We can currently find smartphones with a screen size from 3 to 6 inches (small screen mobile devices), and tablets with a

screen size from 7 up to 10-12 inches (extra-large screen mobiles devices) [4]. Nevertheless, a new kind of mobile device has recently been introduced that is halfway between a smartphone and a tablet, with a screen size from 5 to 6.9 inches: known as the "phablet". Thus, we have a wide range of portable devices with different screen sizes. It is therefore difficult for a user to select the most adequate size to perform a concrete task or use a particular app for his/her daily work.

Moreover, the wide range of laptops on offer start from a

10-11 inch screen size and go up to a maximum of 18 inches [9], increasing by one inch. Users can also find computer monitors with screen sizes from 19 to 30 inches (or even larger in some cases) [5]. Today, therefore, users can interact with screen sizes from only 3 inches up to 30 inches, when they work with a specific application to perform a concrete task. Therefore, we could ask a question: What is the breakpoint for designing a different application for a smartphone, a tablet, a laptop or a desktop computer?

It is clear that an application designed for a desktop computer will run without any problem on a laptop. A user could perform the same tasks with the same efficiency using both platforms. But can we be sure that one app designed for a smartphone will run in the same way on a tablet (or a phablet)? Will the user be able to perform all tasks that can be done on a tablet with the same efficiency on a smartphone? Are there tasks that cannot be performed on a smartphone? Will all users be equally as productive with a tablet as with a smartphone?

In this paper we will test our hypothesis that one app designed for smartphones and adapted for tablets will have different usability aspects: users will perform one task in a different manner and it will take longer on smartphones than on tablets. We designed an experiment to measure the usability of a commercial app designed for both iPhone and iPad. We conducted the experiment with several users to discover the efficiency when executing certain complex tasks. We also collected qualitative data about the usage of the app while users interacted with both devices performing the same tasks sequentially. And, finally, we discovered the main usability problems that users experienced with each device. This experiment reveals that it is important to have a good design for different devices with different screen sizes and quantifies how much more time users spend performing a concrete complex task on a smartphone than on a tablet.

The rest of the paper is organized as follows: an outline of related work is presented in section 2. Next, we present a description of the app designed for both smartphones and tablets that will be used in this study. This is followed by a detailed description of the experiment conducted and methodology employed. The results are then presented and the data obtained are analyzed and compared to the research data. Finally, conclusions and future work are presented.

## 2. Related work

Several studies have focused on the ability of the users to read text on small screens and the capacity of the participants to remember information they have read. In [13] Sanchez & Goolsbee performed a study to find out what the user deficit was when they were remembering information that had been read on a full-size screen compared to when they used a small device. When users rotated the screen of a smart device to landscape orientation that deficit was significantly reduced. The effect of scrolling on a small screen is one of the factors that can lead to this deficit. In a later study, these authors proved that reading on small screens had a negative impact on remembering information, which depended on text and screen size [14]. If the user augments the text size on a small device, the need to scroll

increases and the amount of information recalled decreases. Those users who read a large amount of text on his/her device that has a small screen will need to scroll constantly and consequently the performance of this task will be lower.

The information and text presented on a small screen should be easily comprehensible. The user can be confused if one app presents a large amount of information with a font size that is hard to read. Moreover, the app menus can have a negative effect on reading the screen, unless the user can find a large preview on his/her device and the amount of information in each screen has been optimized. Ziefle presented one study that researches the tradeoff between visual density and menu foresight [16]. The main factors in this tradeoff were the font sizes (8 pts, 12 pts) and the size of the preview with one to five functions per screen at a time. The navigation performance was optimal when font size and the size of the preview were large. The lowest performance was obtained when the preview was small and the font size large, showing that proper orientation is more important than visibility demands.

Screen size and sentence splitting can have an influence on the manipulation of a small device as well as the comprehension of the text by users and therefore the perceived usability or personal perceptions. If the user has to frequently scroll the text, comprehension is not affected. However, when sentences are split on small screens the user has to return to a previous screen to re-read more text. As such, users prefer larger screens to read text as they obtain better comprehension with less effort [7].

When users have to perform complex tasks by typing text on small screens, they achieved a low performance in the execution of their tasks. Texts should be easily readable with large font sizes and, as such, less text will fit on the screen. If the user needs to type some text in this context, the task will be harder to accomplish the virtual keyboard is present on the screen and, thus, the amount of information presented will be even lower. The virtual keyboard reduces the visual area with the information presented on the screen and the user has to enter a certain amount of text, usually with one finger or using a stylus: a hard task in itself [6].

The menus and other navigation areas will also affect the performance and usability of an application designed for small screens [15]. Adapting the interface of an application designed for small screens to the user's needs normally increases the performance and efficiency. Users are more satisfied and perform better with those applications that have adaptive menus instead of applications with an interface not adapted from an application designed for desktop or larger screens [8]. However, the problem when adapting menus is the user's low awareness of the full set of items on the interface, resulting in it being more difficult to discover new features of the application for users.

The attractiveness of a smartphone can affect the perceived usability of a device. In [10] authors found that participants sometimes rate products high in usability despite experiencing obvious usability problems such as low effectiveness or efficiency. The brand and pleasant design can outweigh the low effectiveness or efficiency of the device. They report that attractiveness, effectiveness and efficiency each has independent influence on usability ratings and; moreover, attractiveness had the largest impact.

### 3. Layout

In this work, the tablet and smartphone versions of a mobile application for integral management of a photo studio company were used. PhotoSolutionPro is an application designed for desktops but it also offers versions for iPad and iPhone. We used a demo version of this application for iPad and iPhone and we selected certain modules for the tests design of our experiment.

PhotoSolutionPro is an application that allows the entire workflow to be managed: from appointments, budgets, meetings, models, invoicing, expenses, marketing, profits and cash reports. In Fig. 1 we can see this application's main screen.



Figure 1. The app's main screen to be tested in this experiment (screen capture of the smartphone version: POS, events, customers, accounting, CRM, general preferences).  
Source: The authors.



Figure 2. Screen capture of app's whole screen for the iPhone version. The scroll needed to finish this task can be seen here.  
Source: The authors.

Figure 3. Screen capture of the iPad version where items have been adapted to screen size.

Source: The authors.

The application was developed using a FileMaker Pro database, which allows for the application to be distributed on different platforms: iPad, iPhone, desktop and web.

The design of the PhotoSolutionPro application has been adapted from the desktop version for each mobile device on which the application can be run: iPhone and iPad. Different layouts for the adaptation of the interface to each individual device, in order to achieve the best style were used: different font sizes were employed, the sizes of the buttons were defined for each platform, and different menus or the layout of the different elements of the interface were designed (see Figs. 2, 3).

#### 4. Method

In this experiment we installed a demo version of the PhotoSolutionPro app on an iPad mini with a 7.9 inch screen and a demo of the iPhone version in an iPhone5 with a 4 inch screen. We wanted to test how much time it takes a user to perform certain tasks on a tablet and how much time it takes to perform the same tasks on a smartphone, i.e. we wanted to compare the user's efficiency when performing certain complex tasks on a small screen device with a large screen device. Moreover, we wanted to analyze if the user's effectiveness for each version and perceived usability of the application were affected by the use of devices with different screen sizes.

The definition of usability in ISO 9241 [2] was applied as well as the evaluation questionnaire SUS [1]. All participants were recorded on video using different cameras and devices while they were performing all the tasks that are set out in this experiment.

##### 4.1. Participants

In this experiment we selected eight users who voluntarily attended the test we performed in March 2014. We selected 3 female and 5 males with an age range from 24 to 35 (mean=

31.50, SD=4.38). All the participants owned their own smartphone and their own tablet (although not all of them had an iPhone or an iPad mini like the ones we used in our laboratory). Generally speaking, all participants intensively used their mobile devices on a weekly basis (mean = 20.38 hours/week; SD=14.60), but not all participants had extensive experience in the management of their mobile devices. None of them had previously worked with the app used in this experiment. As all participants were in the same age range, the effect of perceived usability due to the age of participant was minimized [1].

##### 4.2. Procedure

Selected participants were divided into two groups of 4 members each: the minimum number of users acceptable for valid results in usability studies [10]. The first group performed a set of five tasks in sequential order on a tablet and then the same five tasks in sequential order in a smartphone. The second group of 4 users performed a set of five tasks in sequential order on a smartphone and then the same five tasks in sequential order on a tablet. We followed the within-subjects design method to mitigate the effect of learning and we also applied the testing multiple product versions method to compare the two versions of the app [12].

When participants arrived at the lab, they had both devices prepared (iPad mini and iPhone) with the app installed on each device in order to begin testing. Participants did not have to install or configure any parameter on any device. We had previously agreed that the total time to perform all tasks and to fulfill all questionnaires by the same participant should be up to hour.

All participants performed the same tests in the same laboratory under the same conditions. When the participant arrived at the laboratory we explained to her/him the purpose of the tests and we invited her/him to sign a statement of informed consent, given that all participant activities were recorded during the tests.

As none of the participants had used the app previously, we allowed them about 3 minutes to navigate around the screens and menus of the app in the device in which they were going to perform the tasks. We asked participants to orally explain what they thought about the app in general. The participants were allowed to finish all tasks at their own pace and the moderator did not give them any feedback about success or failure in each task. Only in one task did a participant become clogged and, consequently, the moderator stopped the task and invited the participant to continue with the next task.

We then started with the undertaking of the five tasks on each device, and depending on the group the participant was assigned they first started with either the iPad or the iPhone. This process took about 35 minutes for both devices. After finishing the test they completed the SUS questionnaire [3] to register their perceived usability of the overall application.

4.2.1. Equipment and materials

In our laboratory we used a 64Gb iPad Mini with 7.9-inch retina display and 64GB iPhone 5 with 4-inch retina display. We used an iPevo Ziggi-HD 5 Megapixel document camera with built-in microphone to record the movements of the participants' hands while interacting with the mobile device in each test. We also recorded her/his voice with the microphone. In addition, we use a Canon EOS 5D Mark II camera to record a video of the participants' faces in full hd.

4.2.2. Experimental tasks

The five tasks the participants had to perform and the description of each one are described below:

- **Task 1. Register a new customer.** The user must enter a new customer in the application by completing the following information: name, company, position, VATID, date of birth, mobile phone, phone, e-mail, website, address, postcode, city, province and country. The estimated time for performing this task was 180 seconds when using an iPad and 220 seconds when using an iPhone.
- **Task 2. Register a new product.** The user must enter a new product in the application. Product data were: item description, manufacturer, part number, category, location, weight, one photograph of the product (the user had to take it with the camera on the mobile device), cost price, margin, selling price without VAT, selling price with VAT, stock and minimum stock. The estimated time for performing this task was 160 seconds when using an iPad and 180 seconds when using an iPhone.
- **Task 3. Making an appointment for a customer.** The user must assign a date to the customer registered in task 1. The data for the appointment were: date, start time, end time, place, stage of the work, type of work, name of the customer and notes. The estimated time for performing this task was 140 seconds when using an iPad and 150 seconds when using an iPhone.
- **Task 4. Recording the photo session budget.** In this task the user must prepare a budget for a photo session adding several products to the budget and a payment made in advance by the customer. Data to be recorded were: name of first item, name of second item, date of payment in advance, amount and payment method. The estimated time for performing this task was 200 seconds when using an iPad and 240 seconds when using an iPhone.
- **Task 5. Send a newsletter to a customer.** In this last task, the user must send a newsletter to a customer. The data to be recorded for the newsletter were: name of the customer, one photo (which the user had to take it with the camera of the mobile device), subject of the newsletter and body of the newsletter. The estimated time for performing this task was 240 seconds when using an iPad and 260 seconds when using an iPhone.

In Fig. 4 we can see one participant using an iPhone introducing a new product into the app. We captured her hands with the Presenter app of the iPevo document camera



Figure 4. Registering a participant with the document camera and screen capturer of an iPhone.  
Source: The authors.

Table 1.  
Estimated times each task to be completed (in seconds) using both a tablet (column t) and a smartphone (column s)

| Task1 |     | Task2 |     | Task3 |     | Task4 |     | Task5 |     |
|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|
| t     | s   | t     | s   | t     | s   | t     | s   | t     | s   |
| 180   | 220 | 160   | 180 | 140   | 150 | 200   | 240 | 240   | 260 |

Source: The authors.

and we can view the full screen of the iPhone with the Reflector app in the screen of an iMac to register in detail all the keystrokes performed by the participant.

4.3. Measures

4.3.1. Effectiveness on each device

We previously performed all tasks in the laboratory to estimate the time required to undertake each one of the five tasks on both the tablet and the smartphone (see Table 1):

All activities performed by the participants with the tablet and the smartphone were recorded on video. Thus, we can check if the participant had completely finished the task and then calculate the time it took them. Moreover, we have a valuable qualitative data record of each participant's impressions during the tests. The moderator did not give participants any feedback about their success or failure in each task.

4.3.2. Perceived usability of the application

We used the System Usability Scale (SUS) questionnaire [3] after a participant completed all the tasks in both devices in order to measure the perceived usability of the application. Participants rated the ten items in the SUS questionnaire using a scale from 1 (strongly disagree) to 5 (strongly agree). We selected this tool due to its wide acceptance in the usability community and because it is free and easy to complete.

## 5. Results

### 5.1. Effectiveness in tasks

All participants performed the five previous tasks on both an iPad mini and an iPhone. Depending on the group they were assigned, they first performed all tasks sequentially on the tablet and then all tasks sequentially on the smartphone or vice versa. Thus, we could check the effect of learning the application using firstly a large screen device or a small screen device. None of the participants had used the application before. The interface of each version (iPad or iPhone) of the application was not exactly the same; depending on the device and its screen size each version had a different layout, font size or widgets size, because the application was responsively designed for each device (see Figs. 2,3).

In Table 2 we can see the results for the undertaking of all the tasks by all the participants. Participants 1 to 4 performed the tasks firstly on the tablet (on the iPad mini) and then on the smartphone (the iPhone) while participants 5 to 8 performed all tasks firstly on the smartphone (with the iPhone) and then on the tablet (with the iPad).

We can see that all participants completed 100% of all tasks except Participant 1 who only completed 75% of task 4 using the iPhone and Participant 3 who completed 50% of task 5 also using the iPhone. All times showed in this table were real times taken by each participant. The times of participant 1 and 3 who left the two tasks unfinished were estimated in order to gain an approximate time that they

would have needed to complete the task so we could compare them with the rest of times and complete the first group study. In the second group of participants (P5 to P8), all participants fully performed their tasks so we did not need to estimate any times.

#### 5.1.1. Task performance measures

In Table 3 we can see the difference in time spent by each participant in each task and using each device with respect to the times defined for each task's undertaking by the usability team. In general, most participants took less time to perform the tasks using both the tablet and the smartphone. Only Participant 3 required significantly more time while using the tablet instead of the smartphone. This was due to the participant not having enough experience with the use of mobile devices. Participant 8 needed less time to perform all tasks using both the tablet and the smartphone.

Regarding tasks, we can see that Task 4 was the most complex for most participants using a smartphone: three of them needed more than 50% of the estimated time to complete the task (Participant 3 needed 50% extra time, Participant 5 needed 73% extra time and Participant 7 needed 72% extra time). It was a complex task using a previous information search that the participant had undertaken in Task 3, changing this information by adding more data and finally sending one email to a customer. Note that the three above mentioned participants completed this task while Participant 1 was the only one that completed 75% of this task.

Table 2.

Time and completeness of tasks for each participant using different devices (t=tablet; s=smartphone). Time in seconds.

|    | Task1 |      |     |      | Task2 |      |     |      | Task3 |      |     |      | Task4 |      |     |      | Task5 |      |     |      |
|----|-------|------|-----|------|-------|------|-----|------|-------|------|-----|------|-------|------|-----|------|-------|------|-----|------|
|    | t     | %    | s   | %    | t     | %    | s   | %    | t     | %    | s   | %    | t     | %    | s   | %    | t     | %    | s   | %    |
| P1 | 190   | 100% | 244 | 100% | 145   | 100% | 210 | 100% | 134   | 100% | 150 | 100% | 255   | 100% | 211 | 75%  | 265   | 100% | 345 | 100% |
| P2 | 180   | 100% | 192 | 100% | 183   | 100% | 135 | 100% | 127   | 100% | 107 | 100% | 167   | 100% | 155 | 100% | 302   | 100% | 255 | 100% |
| P3 | 255   | 100% | 340 | 100% | 233   | 100% | 220 | 100% | 330   | 100% | 296 | 100% | 355   | 100% | 360 | 100% | 375   | 100% | 310 | 50%  |
| P4 | 193   | 100% | 253 | 100% | 155   | 100% | 155 | 100% | 181   | 100% | 134 | 100% | 154   | 100% | 162 | 100% | 268   | 100% | 222 | 100% |
| P5 | 168   | 100% | 261 | 100% | 119   | 100% | 188 | 100% | 148   | 100% | 132 | 100% | 135   | 100% | 416 | 100% | 238   | 100% | 268 | 100% |
| P6 | 185   | 100% | 246 | 100% | 124   | 100% | 163 | 100% | 136   | 100% | 120 | 100% | 170   | 100% | 299 | 100% | 137   | 100% | 234 | 100% |
| P7 | 166   | 100% | 198 | 100% | 125   | 100% | 184 | 100% | 90    | 100% | 166 | 100% | 155   | 100% | 413 | 100% | 226   | 100% | 400 | 100% |
| P8 | 116   | 100% | 162 | 100% | 89    | 100% | 166 | 100% | 69    | 100% | 216 | 100% | 95    | 100% | 228 | 100% | 182   | 100% | 271 | 100% |

Source: The authors.

Table 3.

Time difference (in seconds) between real time needed by participants and estimated time for each task

|      | Task1 |       | Task2  |       | Task3 |       | Task4  |       | Task5 |        |
|------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|
|      | t     | s     | t      | s     | t     | s     | t      | s     | t     | s      |
| P1   | 10    | 24    | -15    | 30    | -6    | 0     | 55     | 92    | 25    | 85     |
| P2   | 0     | -28   | 23     | -45   | -13   | -43   | -33    | -85   | 62    | -5     |
| P3   | 75    | 120   | 73     | 40    | 190   | 146   | 155    | 120   | 135   | 423    |
| P4   | 13    | 33    | -5     | -25   | 41    | -16   | -46    | -78   | 28    | -38    |
| P5   | -12   | 41    | -41    | 8     | 8     | -18   | -65    | 176   | -2    | 8      |
| P6   | 5     | 26    | -36    | -17   | -4    | -30   | -30    | 59    | -103  | -26    |
| P7   | -14   | -22   | -35    | 4     | -50   | 16    | -45    | 173   | -14   | 140    |
| P8   | -64   | -58   | -71    | -14   | -71   | 66    | -105   | -12   | -58   | 11     |
| Mean | 1.63  | 17.00 | -13.38 | -2.38 | 11.88 | 15.13 | -14.25 | 55.63 | 9.13  | 74.75  |
| SD   | 35.94 | 50.92 | 41.71  | 26.62 | 74.56 | 58.55 | 76.49  | 97.44 | 67.99 | 142.91 |

Source: The authors.

Table 4.

Increase in time to perform one task on smartphone vs. the same task on a tablet (in %). Participants performed all tasks first on a tablet and then on a smartphone

| T-S  | Task1 | Task2  | Task3  | Task4 | Task5  | Mean   | SD    |
|------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|
| P1   | 28.42 | 44.83  | 11.94  | 30.20 | 30.19  | 29.11  | 11.67 |
| P2   | 6.67  | -26.23 | -15.75 | -7.19 | -15.56 | -11.61 | 12.25 |
| P3   | 33.33 | -5.58  | -10.30 | 1.41  | 82.13  | 20.20  | 38.59 |
| P4   | 31.09 | 0.00   | -25.97 | 5.19  | -17.16 | -1.37  | 22.10 |
| Mean | 24.88 | 3.25   | -10.02 | 7.40  | 19.90  | 9.08   | 18.82 |
| SD   | 12.31 | 29.92  | 16.02  | 16.05 | 46.94  | 13.86  |       |

Source: The authors.

Task 5 was also a complex one where the participant had to take a picture with the device, write text and send an email. Only Participant 7 needed 54% extra time than the estimated time to complete this task, while the remaining participants completed this task in the estimated time or less. Note that Participant 3 completed 50% of this task (he would have needed almost twice the time estimated by the usability team to fully complete the task). Therefore it can be considered that this task presents a cognitive load for some users who may consider that they have finished the task when actually they had only completed half of the task.

Nevertheless, all participants completed both Task 4 and Task 5 using the tablet in the estimated time, some of them using far less time than the estimated duration.

Interestingly enough, the most complex task for participants performed on a smartphone (Task 4) was also the task which participants needed less time to complete with the tablet, especially for the group of participants who used the tablet last. This proves that an adequate responsive design and a large screen can greatly improve efficiency in the undertaking of a complex task.

## 5.2. Efficiency in the undertaking of tasks

Participants carried out the five tasks on both a tablet and a smartphone. The first group performed first the tasks on a tablet and then on the smartphone. We calculated the time difference to perform each task on the iPhone in comparison to the iPad. In Table 4 we can see the percentage of time that each participant in the first group needed to perform all tasks on an iPhone with regards to the same task on an iPad (data in %). We can see that in general, one user will need around 9% more time to perform all tasks with an iPhone than with an iPad when participants performed all tasks using the tablet first.

The second group performed the tasks first on a smartphone and then on a tablet. Again, we calculated the time difference to perform each task on the iPhone in comparison to the iPad. In Table 5 we can see the percentage of time that each participant in the second group needed to perform all tasks on an iPhone in comparison to the same task on an iPad (data in %). We can see that generally, a user will need around 72% more time to perform all tasks in an iPhone than on an iPad when users performed all tasks first on a smartphone.

Table 5.

Increase in time to perform one task on smartphone vs. the same task on a tablet (in %). Participants performed first all tasks on a smartphone and then on a tablet

| S-T  | Task1 | Task2 | Task3  | Task4  | Task5 | Mean   | SD    |
|------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|
| P5   | 55.36 | 57.98 | -10.81 | 208.15 | 12.61 | 64.66  | 85.33 |
| P6   | 32.97 | 31.45 | -11.76 | 75.88  | 70.80 | 39.87  | 35.49 |
| P7   | 19.28 | 47.20 | 84.44  | 166.45 | 76.99 | 78.87  | 55.36 |
| P8   | 39.66 | 86.52 | 213.04 | 140.00 | 48.90 | 105.62 | 71.86 |
| Mean | 36.82 | 55.79 | 68.73  | 147.62 | 52.33 | 72.26  | 27.47 |
| SD   | 14.99 | 23.20 | 106.27 | 55.45  | 29.09 | 43.64  |       |

Source: The authors.

The effect of learning the application on a smartphone implies that participants were much more effective in executing the same tasks on a tablet (a device with larger screen) with which much less scroll was required. We can see that the times it took to undertake the tasks performed with an iPhone are much greater than times of the tasks performed with an iPad. As such, we can say that users who use an iPad are more productive if they have previously learned the application on an iPhone. However, if the users learned an application on a large screen device and then they use that application on a small screen device, they can achieve faster times but not as fast as they achieved with a large screen.

## 5.3. Efficiency per device

Participants 1 to 4 performed all tasks on a tablet first and then on the smartphone. In Table 6 we can see the increase (or decrease) in time needed to perform all tasks in comparison to the estimated time for each task using each device. Our participants needed on average 21% more time to finish the tasks with a tablet, whereas they needed on average only 16% extra time to perform all tasks with a smartphone. So, they needed on average 5% less time to perform all tasks with the second device when they learned the use of the application on the tablet.

Moreover, participants 5 to 8 performed all tasks on a smartphone first and then on the tablet. In Table 7 we can see the increase (or decrease) in time needed to perform all tasks compared to the estimated time for each task with each device. These participants needed on average 11% more time to finish the tasks with a smartphone, whereas they needed on average only 22% less time to perform all tasks with a tablet. So, they needed on average 33% less time to perform all tasks with the second device when they learned the application on the smartphone.

Therefore, we can conclude that the device that was firstly used to perform the tasks can greatly influence the participants' efficiency. Users who used the tablet first needed 5% less time on average to perform the same tasks than those using the tablet last. However, users who learned the application with the smartphone and then repeated the tasks with the tablet were able to reduce the time required by an average of 33% to perform all tasks. It can be seen that the use of large screen devices can very considerably increase users' efficiency (see Fig. 5)

Table 6.

Increase (or decrease) in time need to perform a task regarding estimated times for participants who performed the test first with tablet and then with smartphone.

| T-S  | Tablet |       |        |        |       |       | Smartphone |        |        |        |        |        |
|------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|      | Task1  | Task2 | Task3  | Task4  | Task5 | Mean  | Task1      | Task2  | Task3  | Task4  | Task5  | Mean   |
| P1   | 5.6%   | -9.4% | -4.3%  | 27.5%  | 10.4% | 6.0%  | 10.9%      | 16.7%  | 0.0%   | 38.3%  | 32.7%  | 19.7%  |
| P2   | 0.0%   | 14.4% | -9.3%  | -16.5% | 25.8% | 2.9%  | -12.7%     | -25.0% | -28.7% | -35.4% | -1.9%  | -20.7% |
| P3   | 41.7%  | 45.6% | 135.7% | 77.5%  | 56.3% | 71.4% | 54.5%      | 22.2%  | 97.3%  | 50.0%  | 162.7% | 77.4%  |
| P4   | 7.2%   | -3.1% | 29.3%  | -23.0% | 11.7% | 4.4%  | 15.0%      | -13.9% | -10.7% | -32.5% | -14.6% | -11.3% |
| Mean | 13.6%  | 11.9% | 37.9%  | 16.4%  | 26.0% | 21.2% | 16.9%      | 0.0%   | 14.5%  | 5.1%   | 44.7%  | 16.2%  |
| SD   | 16.4%  | 21.3% | 58.4%  | 40.3%  | 18.5% |       | 24.2%      | 19.9%  | 48.9%  | 39.3%  | 70.3%  |        |

Source: The authors.

Table 7.

Increase (or decrease) in time need to perform a task regarding estimated times for participants who performed the test first with smartphone and then with tablet.

| S-T  | Smartphone |       |        |       |        |       | Tablet |        |        |        |        |        |
|------|------------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|      | Task1      | Task2 | Task3  | Task4 | Task5  | Mean  | Task1  | Task2  | Task3  | Task4  | Task5  | Mean   |
| P5   | 18.6%      | 4.4%  | -12.0% | 73.3% | 3.1%   | 17.5% | -6.7%  | -25.6% | 5.7%   | -32.5% | -0.8%  | -12.0% |
| P6   | 11.8%      | -9.4% | -20.0% | 24.6% | -10.0% | -0.6% | 2.8%   | -22.5% | -2.9%  | -15.0% | -42.9% | -16.1% |
| P7   | -10.0%     | 2.2%  | 10.7%  | 72.1% | 53.8%  | 25.8% | -7.8%  | -21.9% | -35.7% | -22.5% | -5.8%  | -18.7% |
| P8   | -26.4%     | -7.8% | 44.0%  | -5.0% | 4.2%   | 1.8%  | -35.6% | -44.4% | -50.7% | -52.5% | -24.2% | -41.5% |
| Mean | -1.5%      | -2.6% | 5.7%   | 41.3% | 12.8%  | 11.1% | -11.8% | -28.6% | -20.9% | -30.6% | -18.4% | -22.1% |
| SD   | 17.8%      | 6.1%  | 24.8%  | 33.2% | 24.4%  |       | 14.3%  | 9.2%   | 23.1%  | 14.1%  | 16.6%  |        |

Source: The authors.

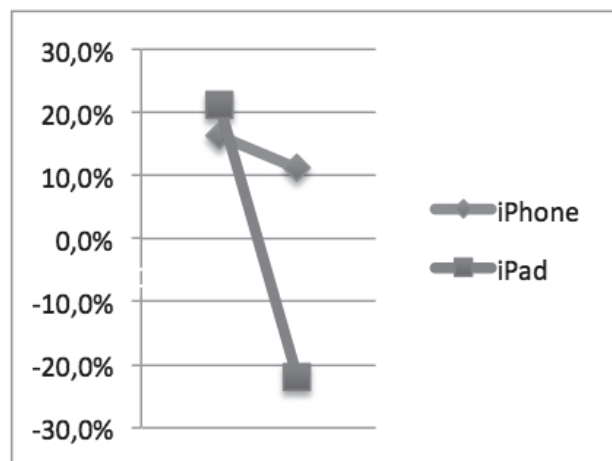


Figure 5. Effect of learning one application on a smartphone can considerably increase the user's efficiency when they use a tablet last.

Source: The authors.

#### 5.4. Usability problems detected

All participant activities were video recorded during testing. Usability problems reported by participants were noted when reviewing the post-test recordings. In Table 8 we can see the number of problems reported by each participant for both the tablet and the smartphone. We can see that the average number of problems reported for tablets was 6.13, while the average number of the problems reported for smartphones was 7.89. We can also see that the participants who performed the tasks primarily with a tablet (P1 to P4) reported more usability problems with this tablet (36) than after testing with smartphone (22). However, participants

Usability problems detected by participants and by device during the tests.

|      | Problems detected |      |       |
|------|-------------------|------|-------|
|      | T                 | S    | Total |
| P1   | 9                 | 8    | 17    |
| P2   | 4                 | 1    | 5     |
| P3   | 10                | 6    | 16    |
| P4   | 13                | 7    | 20    |
| P5   | 5                 | 12   | 17    |
| P6   | 3                 | 10   | 13    |
| P7   | 2                 | 10   | 12    |
| P8   | 3                 | 9    | 12    |
| Mean | 6.13              | 7.89 | 14    |
| SD   | 4.02              | 3.36 | 4.60  |

Source: The authors.

who performed the tests with the smartphone first (P5 to P8) reported more errors (41) when using the smartphone than when testing with the tablet last (13). Moreover, the most number of problems were reported when using the smartphone first. When these users repeated the tasks with the tablet last, they were more efficient and reported fewer problems.

##### 5.4.1. Types of usability problems detected

We analyzed all the videos recorded with the participants and noted all their usability problems. We prioritized each problem by how critical it was to organize the problems that should be first solved by the development team. We also categorized each problem by severity using the Jeffrey Rubin four-point scale [12] to rank each problem: 4-Unusable, 3-Severe, 2-Moderate, 1-Irritant.

Table 9 shows the main usability problems detected by participants for all tasks and is ordered by the number of

Table 9.

Usability problems detected by participants: ordered by frequency of the problem per task.

| ID | Error description                                                                                                                                                                    | Freq |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1  | The user has problems with the use of the date picker control of iOS to enter a date.                                                                                                | 15%  |
| 2  | The user does not know how to find customers using CRM filters.                                                                                                                      | 13%  |
| 3  | The user cannot find where record payments on account are.                                                                                                                           | 11%  |
| 4  | In the overview of the budget, it is difficult for the user to introduce a new item into the budget.                                                                                 | 10%  |
| 5  | The user cannot find the Save and Exit button easily.                                                                                                                                | 9%   |
| 6  | The user cannot see the magnifier button to add a new item in the budget creation.                                                                                                   | 8%   |
| 7  | The user does not know how to delete long text in the Body field and he erases it letter-by-letter or word-by-word.                                                                  | 8%   |
| 8  | After filtering some customers, the user touches the customer name and the app shows the customer data. The user is confused and does not know how to return to the previous screen. | 8%   |
| 9  | When the user wants to select a start time, the date picker partially covers the field data of the appointment and it is difficult for the user completing the task.                 | 6%   |
| 10 | The user does not see the next button to move to the next field.                                                                                                                     | 6%   |
| 11 | The user does not know how to access a particular day in the calendar. S/He does not know that s/he can press the today, week, month or view buttons.                                | 6%   |
| 12 | When registering an appointment, s/he writes the name of the customer, rather than selecting from the list.                                                                          | 6%   |
| 13 | The user mistakes the Sales Price field with the Sales Price excl. VAT field.                                                                                                        | 5%   |
| 14 | The user is not aware of the "Profit margin" dropdown list. Instead of selecting from the dropdown, s/he creates the profit margin using the keyboard.                               | 3%   |
| 15 | From the start menu, the user does not know where to introduce an appointment. S/He does not know that s/he has to access to Agenda.                                                 | 3%   |

Source: The authors.

times the problem was detected by any participant while undertaking any task (Frequency). The main problems are related to the date picker control of the iOS system and to how to find any field or button to perform a concrete task.

Next, we assigned a severity index to each one of all of these usability problems detected by our participants. We defined two usability problems with a severity index of 3. In both cases the user was not able to find a field to introduce data and so s/he could not accomplish the task in time. In certain cases s/he could not finish the task properly. We marked four usability problems with a severity index of 2, all of them related to problems with the handling of some control (date picker, magnifier button) or with the use the iOS operating system itself. The remaining nine usability problems detected were defined with a severity index of 1 as we considered them to be minor usability problems and normally participants could accomplish the tasks without more problems.

In order to define a list of problems to be solved by the PhotoSolutionPro app development team we calculated a new factor by multiplying the frequency of the usability problem by the severity index assigned. Thus, we obtained a new list with a different order, which can be seen in Table 10. All usability problems are presented in order as per how

Table 10.

Usability problems detected by participants; ordered by frequency x severity

| ID | Error description                                                                                                                                                                    | Freq | Sev | Freq x Sev |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-----|------------|
| 3  | The user could not find record payments on account.                                                                                                                                  | 11%  | 3   | 34%        |
| 4  | In the overview of the budget, it is difficult for the user to introduce a new item into the budget.                                                                                 | 10%  | 3   | 30%        |
| 1  | The user has problems with the use of the date picker control of iOS to enter a date.                                                                                                | 15%  | 2   | 30%        |
| 2  | The user does not know how to find customers using CRM filters.                                                                                                                      | 13%  | 2   | 25%        |
| 6  | The user cannot see the magnifier button to add a new item in the budget creation.                                                                                                   | 8%   | 2   | 15%        |
| 11 | The user does not know how to access a particular day in the calendar. S/He does not know that s/he can press the today, week, month or view buttons.                                | 6%   | 2   | 13%        |
| 5  | The user cannot find the Save and Exit button easily.                                                                                                                                | 9%   | 1   | 9%         |
| 7  | The user does not know how to delete long text in the Body field and he erases it letter-by-letter or word-by-word.                                                                  | 8%   | 1   | 8%         |
| 8  | After filtering some customers, the user touches the customer name and the app shows the customer data. The user is confused and does not know how to return to the previous screen. | 8%   | 1   | 8%         |
| 9  | When the user wants to select a start time, the date picker partially covers the field data of the appointment and it is difficult for the user completing the task.                 | 6%   | 1   | 6%         |
| 10 | The user does not see the next button to move to the next field.                                                                                                                     | 6%   | 1   | 6%         |
| 12 | When registering an appointment, s/he writes the name of the customer, rather than selecting from the list.                                                                          | 6%   | 1   | 6%         |
| 13 | The user mistakes the Sales Price field with the Sales Price excl. VAT field.                                                                                                        | 5%   | 1   | 5%         |
| 14 | The user is not aware of the "Profit margin" dropdown list. Instead of selecting from the dropdown, s/he creates the profit margin using the keyboard.                               | 3%   | 1   | 3%         |
| 15 | From the start menu, the user does not know where to introduce an appointment. S/He does not know that s/he has to access to Agenda.                                                 | 3%   | 1   | 3%         |

Source: The authors.

frequently they were reported and their level of severity. It is our opinion that first problems that should be considered by the development team were those problems with a factor index greater than 10%. So, we recommended that the application development team first solve the six problems relating to the introduction of data into the app.

### 5.5. Perceived usability

After finishing their tests, all participants completed the SUS questionnaire in order that the perceived usability of the application was defined. An average of 83.44 (SD = 11.18) was obtained.

We observed that participants who performed the tasks first with the tablet and then with the smartphone obtained a mean score of 82.5 (SD = 8.17), while participants who performed the tasks first with the smartphone and then with the tablet obtained a mean score of 84.34 (SD = 14.91).

As can be seen, the perceived usability for users who first performed tests with a small screen device is greater than if they first used a large screen device. When first using a smartphone, with which the user needs more time to perform all tasks, the results obtained were that the perceived usability of the application was greater than users who performed the tasks first with tablet and later with the smartphone.

## 6. Conclusion

In this research we observed how the use of large screen devices could improve the user efficacy when they have to accomplish complex tasks.

All users were able to perform all tasks both on a tablet and a smartphone, or they at least thought they had finished their tasks successfully. Only two participants did not completely finish tasks on a smartphone. So, in general, it can be said that complex tasks can be performed on a smartphone, although the same task performed on a large screen device will be executed more efficiently.

Normally a user needs more time to complete a task on a smartphone than the same task in a tablet. This time may increase considerably when the user has to type any text on the device or has to search for information on a small screen device. Users who managed a smartphone first and a tablet later took much less time to perform the tasks on the tablet. When we gave a smartphone first to the users and asked them to perform the tasks, they usually needed the same or less time than we had estimated, but when they performed the same tasks with the tablet, the learning effect was greater than if the users would have been first trained with a tablet (see Fig. 5)

It can be concluded that one tablet user can be up to 72% more productive on a tablet than on a smartphone. When we asked users to perform the tasks on a smartphone, and then on a tablet, it was observed that users needed much less time to complete all the tasks. The perceived usability of the application is slightly greater when users employed a smartphone for the first time. When a user has to perform a task with a large screen device, s/he normally feels more comfortable and her/his perceived usability of the app will increase. The number of usability problems reported when performing the tasks with a tablet is lower on average than the number reported when performing the tasks with a smartphone. When the users have to perform the tasks first with a smartphone, they report the biggest amount of usability problems.

## References

- [1] Bangor, A., Kortum, P.T. and Miller, J.T., An empirical evaluation of the system usability scale. *Intl. Journal of Human-Computer Interaction*, 24 (6), pp. 574-594, 2008.
- [2] Bevan, N., International standards for usability should be more widely used. *Journal of Usability Studies*, 4 (3), pp. 106-113, 2009.
- [3] Brooke, J., SUS: A 'quick and dirty' usability scale. *Usability evaluation in industry*, pp. 189-194, 1996.
- [4] Cnet. Tablets buying guide. [Online]. Available at: <http://www.cnet.com/topics/tablets/buying-guide/>

- [5] Computer monitor buying guide. [Online]. Available at: <http://www.digitaltrends.com/buying-guides/computer-monitor-buying-guide/#!BkZYF>
- [6] Dell'Amico, M., Díaz, J.C.D., Iori, M. and Montanari, R., The single-finger keyboard layout problem. *Computers & Operations Research*, 36 (11), pp. 3002-3012, 2009.
- [7] Dillon, A., Richardson, J. and Mcknight, C., The effects of display size and text splitting on reading lengthy text from screen. *Behaviour & Information Technology*, 9 (3), pp. 215-227, 1990. DOI: 10.1080/01449299008924238
- [8] Findlater, L. and McGrenere, J., Impact of screen size on performance, awareness, and user satisfaction with adaptive graphical user interfaces. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems CHI '08*, pp. 1247-1256, 2008.
- [9] Laptop Buying Guide. 9 Essential Tips, 2014. [Online]. Available at: <http://blog.laptopmag.com/laptop-buying-guide>
- [10] Nielsen, J., Why you only need to test with 5 users, 2000. [Online]. Available at: <http://www.useit.com/alertbox/20000319.html>
- [11] Quinn, J.M. and Tran, T.Q., Attractive phones don't have to work better: Independent effects of attractiveness, effectiveness, and efficiency on perceived usability. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. CHI '10*. Pp. 353-362, 2010.
- [12] Rubin, J. and Chisnell, D., *Handbook of usability testing: How to plan, design, and conduct effective tests*. John Wiley & Sons, 2008.
- [13] Sanchez, C.A. and Branaghan, R.J., Turning to learn: Screen orientation and reasoning with small devices. *Computers in Human Behavior*, 27 (2), pp. 793-797, 2011.
- [14] Sanchez, C.A. and Goolsbee, J.Z., Character size and reading to remember from small displays. *Computers & Education*, 55 (3), pp. 1056-1062, 2010.
- [15] Schmitz, B. and Zwick, C., *Designing for small screens*. AVA Publishing, 2006.
- [16] Ziefle, M., Information presentation in small screen devices: the trade-off between visual density and menu foresight. *Applied Ergonomics*, 41 (6), pp. 719-723, 2010.

**F. Botella**, received his MSc. in Computer Science and his PhD. in Computer Science from the University of Alicante, Spain. Currently he is associate professor at the Department of Statistics, Mathematics and Computer Science of the Miguel Hernández University (MHU) in Elche, Spain, where he joined in 1997. He has also been a member of the Center of Operations Research University Institute of the MHU since 1999. He has been Director of this Institute from 2011. He has also led the Webdecision Research Group at the MHU since 2007. His research interests are focused on HCI, UX, Usability, UCD, Personalization and e-Health mobile apps.

**J. P. Moreno**, received his MSc. in Research in Industrial Technologies and Telecommunication at the Miguel Hernández University (MHU) in Elche, Spain. He is currently a PhD. student on the Doctoral Program in Statistics, Optimization and Applied Mathematics at the Miguel Hernández University, Spain. He is also part-time professor at the Department of Statistics, Mathematics and Computer Science at Miguel Hernández University. His research interests are focused on HCI, mobile usability and UCD.

**A. Peñalver**, received his MSc. in Computing Science and his PhD. from the University of Alicante, Spain. He works as an assistant professor at the Department of Statistics, Mathematics and Computer Science of the Miguel Hernández University (MHU), Spain. He is the leader of the Human Computer Interaction and Pattern Recognition Group at the Center of Operations Research University Institute in MHU and he is also a member of the Mobile Vision Research Lab group at Alicante University, Spain. He was also Deputy Director of the Center of Operations Research University Institute of the MHU. His research interests are focused on HCI, Usability, mobile apps, Information Theory and Statistical Pattern Recognition.

## Assessing the awareness mechanisms of a collaborative programming support system

Ana Isabel Molina <sup>a</sup>, Jesús Gallardo <sup>b</sup>, Miguel Ángel Redondo <sup>c</sup> & Crescencio Bravo <sup>d</sup>

<sup>a</sup> Escuela Superior de Informática de Ciudad Real, Universidad de Castilla-La Mancha, Spain, [AnaIsabel.Molina@uclm.es](mailto:AnaIsabel.Molina@uclm.es)

<sup>b</sup> Escuela Universitaria Politécnica de Teruel, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, Spain, [Jesus.Gallardo@unizar.es](mailto:Jesus.Gallardo@unizar.es)

<sup>c</sup> Escuela Superior de Informática de Ciudad Real, Universidad de Castilla-La Mancha, Spain, [Miguel.Redondo@uclm.es](mailto:Miguel.Redondo@uclm.es)

<sup>d</sup> Escuela Superior de Informática de Ciudad Real, Universidad de Castilla-La Mancha, Spain, [Crescencio.Bravo@uclm.es](mailto:Crescencio.Bravo@uclm.es)

Received: February 18<sup>th</sup>, 2015. Received in revised form: March 24<sup>th</sup>, 2015. Accepted: September 29<sup>th</sup>, 2015.

### Abstract

The learning and teaching of Programming can benefit from the principles of *Computer Supported Collaborative Learning* (CSCL). With that purpose in mind, the COLLECE system was created to support synchronous collaborative programming in learning settings. Unlike other systems with similar objectives, COLLECE incorporates many elements to support group awareness. This article presents an empirical study in which the usefulness of some of the awareness mechanisms included in this system is evaluated. One of the main contributions of this work is the combination of different techniques to evaluate interactive systems, such as questionnaires, laboratory testing, heuristic evaluation, automatic logging and eye tracking techniques. The joint use of these techniques (of both a subjective and objective nature) allows us to carry out a more complete analysis of the system under study and, in particular, about its support of awareness.

**Keywords:** Collaborative programming; evaluation; usability; groupware, awareness; eye tracking.

## Evaluando los mecanismos de awareness de un sistema de soporte a la programación colaborativa

### Resumen

El aprendizaje/enseñanza de la programación puede beneficiarse de los principios del *Aprendizaje Colaborativo soportado por Computador* (CSCL). Con el objetivo de soportar tareas de programación colaborativa distribuida sincrónica se creó el sistema COLLECE. A diferencia de otros sistemas con objetivos similares, COLLECE incorpora una gran cantidad de elementos de soporte al awareness. En este artículo se describe un estudio empírico en el que se evalúa la utilidad de algunos de los mecanismos de awareness incluidos en este sistema. Una de las principales aportaciones de este trabajo es la combinación de varias técnicas de evaluación de sistemas interactivos (cuestionarios, testing en laboratorio, evaluación heurística, logging automático y técnicas de seguimiento ocular). El uso conjunto de todas estas técnicas (algunas objetivas y otras subjetivas) permite realizar un análisis más completo del sistema objeto de estudio y, en particular, de su soporte al awareness.

**Palabras clave:** Programación colaborativa, evaluación, usabilidad, groupware, awareness, eye tracking.

### 1. Introduction

The advantages that have arisen lately in the area of telecommunications and the Internet have allowed the principles of *Computer Supported Cooperative Work* (CSCW) [1] to be applied in several fields; programming learning is one such field. In *collaborative programming* two or more members of a team collaborate synchronously on the

same programming task from geographically distributed locations, using generic or specific groupware tools.

In order to support this activity, the COLLECE tool (*COLL*aborative *E*dition, *C*ompilation and *E*xecution of programs) was developed [2]. COLLECE allows for the editing, compilation and execution of programs written in Java and C languages. This system has been evaluated in several settings with different goals. For example, the quality

of the products obtained by a group of programmers has been analyzed, together with the process that results in these programs as final solutions to a problem [3]. We have also carried out some evaluation studies based on users' -who have made use of the system- opinions. We have worked with programming students as well as with developers from a software company [2].

One of the most important features to consider when developing groupware systems is their *awareness* support [4]. Awareness can be defined as the perception of the activity the members of a group are undertaking and their knowledge about it. The use of techniques for awareness support allows for a context to be provided on the activity itself, and this improves the effectiveness and efficiency of the group work [5].

In this work we focus on analyzing and evaluating the *awareness* mechanisms provided by the COLLECE system. Unlike previous evaluations, which were mainly based on the subjective opinion of users, in this work we propose to complement such information with that which is provided by an eye tracker device. The concept of *eye tracking* refers to a set of technologies which monitor and record the way a person looks at a particular scene or image, and, specifically, in what areas he/she focuses his/her attention, for how long and in which order he/she visually explores the material provided. The eye tracking technique has been applied in various disciplines and areas of study: marketing, advertising and evaluation of user interfaces (including web pages) [6,7], etc. By applying this technique, evaluators can obtain objective measurements of a physiological nature about users' visual behavior when they interact with an interactive application. In addition, we can complement the data provided by subjective sources of information (for example, the learner's subjective perception collected by questionnaires about his/her satisfaction) and contrast it with this objective source of information.

The remainder of the paper is structured as follows: in the following section we review the main works related to the field of collaborative programming, as well as some techniques for the evaluation of collaborative systems. Next, in Section 3, we describe the features of the COLLECE system, focusing on its awareness support. In Section 4 we move on to describe the results of the empirical study carried out, as well as the results obtained. Lastly, in Section 5, we present the conclusions derived from the work and the following lines of research.

## 2. Background

In this section we review some related work and present some foundations that will be useful for an adequate understanding of the work we describe in this article. First, we talk about awareness and its support in collaborative programming systems. Later, in Section 2.3, we talk about techniques for evaluating the usability of collaborative systems as well as their awareness support. Section 2.4 deals with the use of eye tracking techniques to evaluate these aspects more objectively.

### 2.1. Awareness support in collaborative systems

Collaborative systems introduce new concepts and requirements, such as shared workspaces and collaboration protocols, which do not exist in single-user systems. Perceiving and understanding the responsibilities, activities and intentions of other members of a collaborating ensemble is a basic requirement for group interaction [8]. In face-to-face interaction, it is easy for collaborators to establish a shared background of understanding about who else is present in a workspace, what other collaborators are doing, and so on. However, when group members are geographically spread out, maintaining awareness of group members is much more difficult. In order to facilitate group collaboration effectively, groupware systems must provide group awareness support. *Group awareness* is defined as "an understanding of the activities of others, which provides a context for your own activity" [4].

Many techniques have been applied in several systems to support group awareness. The more commonly used mechanisms of capturing and presenting awareness information are the called *2D on-screen awareness mechanisms*. This group includes the WYSIWIS (*What You See Is What I See*) technique, and the incorporation of telepointers, radar views, multi-user scrollbars, or fisheye views [9,10] in graphical user interfaces of groupware systems. All these mechanisms are based on capturing and tracking keyboard events, mouse events or viewports to obtain information about collaborators' activities in a shared workspace. Other systems incorporate *audio and video-mediated awareness mechanisms*. The use of audio and video channels is very useful in supporting communication between members of a group. In recent years a new category of awareness mechanisms has gained the attention of researchers: *sensor-mediated awareness mechanisms*. This approach proposes the use of specialized sensors, visual signals and devices to support group awareness. Examples of such tools include eye tracking, electronic badges and sensors or even wearable appliances [11].

### 2.2. Systems for supporting Collaborative Programming

Computer Programming is a complex and creative task that can take advantage of collaborative environments and thus be supported and enhanced using groupware systems and distributed architectures. Collaborative programming allows distributed programmers or students that are learning this discipline to work together on the same program or software application. *Collaborative Programming* is a promising tool to scaffold the collaborative learning of Programming, especially since Programming is a difficult subject for students to learn and for teachers to teach. Johnson [12] points out that the process of analyzing and criticizing software artifacts produced by others is a powerful method for learning programming languages, design techniques and application domains.

There are a great number of works that have faced the challenge of supporting *Distributed Collaborative*

*Programming*. For example, RECIPE (*REal-time Collaborative Interactive Programming Environment*) [13] allows programmers who are geographically spread out to concurrently participate in the design, implementation, testing, debugging and documentation of a program. In order to achieve this, RECIPE allows for the conversion of single user compilers and debuggers in collaborative applications. In the same way, it allows for the integration of existing collaborative editors into the system. However, it does not provide specialized tools for the communication among programmers, and it also lacks some awareness support tools due to its high coupling. Another environment that supports the edition, compilation and execution of programs is DPE [14]. This system includes some communication channels, both textual and audio-based. However, DPE also has limited support for awareness and task coordination. Other similar approaches have attempted to integrate collaborative support in the *Eclipse* environment by making use of plug-ins. One of the most relevant works in this field is *Jazz Sangam* [15], which, among other functionalities, includes instant messaging and version control.

Such systems usually have some limitations regarding awareness support due to their high coupling and to the lack of specific tools for coordination and communication. Thus, the presence of elements for awareness support is one of the most relevant defects of most systems that support collaborative programming, even when it is an essential feature for improving the experience of the collaborative work. Therefore, one of the points on which we focused when developing COLLECE, was the suitable awareness support, as we will discuss in Section 3.

### 2.3. Techniques for evaluating Collaborative usability and awareness support

One of the main needs that arise once a collaborative system has been implemented is to evaluate its usability and the support it gives to the collaborative activity.

Different methods have been proposed to evaluate *usability*, but they mainly refer to single-user systems. These methods include consistency inspection techniques, techniques for inspecting standards, the use of cognitive walkthroughs and heuristic evaluation [16]. However, these techniques, although they are useful up to a point, are not the most appropriate for the evaluation of groupware systems. Therefore, other techniques are used to evaluate the usability of this type of systems. The work carried out by Pinelle and Gutwin [17] suggests that *groupware usability* be defined as the “extent to which a groupware system allows teamwork to occur –effectively, efficiently and satisfactorily– for a particular group and a particular group activity”. Some of the new techniques for groupware usability evaluation are basic inspection methods, cognitive walkthroughs adapted to collaborative systems [17] and an adaptation of the Nielsen heuristics for application to groupware systems [18].

In this work we are interested in the *evaluation of awareness support* of collaborative systems. There are several works that address this issue. In Convertino et al.

[19], the authors carried out some evaluation studies about *activity awareness*. This has been achieved by means of some tasks in which whether the mechanisms perceive both synchronous and asynchronous work is tested. The suitable choice of these tasks, which should copy the real work carried out with the tools, is the key to performing a valuable evaluation. In general, there are several problems that must be faced when evaluating awareness support. On the one hand, the first problem is the fact that the reception of awareness information may generate an interruption in the work of the user, and on the other hand the second is the possible interference in the privacy of the user that may occur when managing and visualizing such information. Both problems are analyzed in works such as the one by Röcker and Magerkurth [20], in which they try to find a different approach to the design of user interfaces that solve those problems. Lastly, we want to mention the checklists proposed by Antunes et al. [21], which can be very useful for software developers when examining the quality of the awareness support in their developments.

Several authors have tried to formalize the different concepts relating to awareness by proposing theories, frameworks and taxonomies and have tried to help developers and evaluators when considering these aspects in the development and evaluation of collaborative systems. One of the most outstanding contributions in this field is the *Theory of Awareness* by Gutwin & Greenberg [22], which includes a framework that defines different awareness elements and makes the validation of awareness support possible by means of a set of relevant questions. The main contribution of the work by Gutwin and Greenberg has been to identify the elements of knowledge that make up the core of *workspace awareness*, each one relating to the question answered in order to provide that element of knowledge.

However, most of these awareness evaluation techniques are based on heuristic frameworks and the use of questionnaires and checklists completed by experts (in the case of heuristic evaluation) or by system users. Most of these techniques are highly subjective and, therefore, the results obtained in their application are highly subject to biases. In this paper we propose complementing such evaluation with more objective techniques, in particular, with eye tracking techniques [6].

### 2.4. Using Eye tracking techniques to evaluate collaborative systems

Interest in the use of eye tracking techniques has increased in recent years as a means of understanding and analyzing the visual attention of users. Eye tracking sessions allow us to draw conclusions about the behavior of visual exploration that users perform when interacting with a software system. Since those measures are of a physiological nature, the results are less subject to biases and cannot be controlled by users. This analysis technique has been used successfully in usability studies of single-user interactive systems, mainly web pages [6,7].

When we carry out an eye tracking sessions, we can perform a quantitative analysis of the test results or a qualitative one. In this last case, we can use two representations: *heat maps* and *scan path* or *gaze plot*, which allows us to graphically show the visual behavior of a user or a group of users. If we want to perform a quantitative analysis, we can use several **metrics** that we can collect by means of the eye tracker device [7]. These metrics can be used to determine the areas of the interface where users focus their attention or the cognitive effort involved when they try to understand the visual information provided. Before obtaining the metrics it is necessary to define the so-called *areas of interest* (AOI) of the image displayed. The definition of these AOIs depends on the specific task that is to be performed, and it delimitates those areas of the displayed image or user interface for which we want to obtain the metrics.

Most metrics collected are related to the number and duration of the so-called *fixations* (when the eye remained stationary, focused on an AOI for a certain period of time). It is necessary to point out that a metric can be interpreted in different ways. For example, longer fixations can mean that a user found a particular area interesting but it can also mean that they found the area difficult to interpret. Hence, it is important to attempt to supplement eye tracking data with additional information gained from the participants about their experiences during the activity.

Recently, eye tracking research has witnessed a leap from the single-user scenarios to multiple user, collaborative domains. New concepts have appeared, such as the so-called *dual eye tracking* [23] or remote transfer of points on which the user is focusing his/her attention (called *gaze transfer* [24]).

We can see, therefore, that there is great potential in using this new source of information for evaluating interactive systems in general, as well as collaborative systems, more specifically. Using the metrics provided by the eye tracker allows for contrast and complements other information sources commonly used for assessing these systems. In our case we will use it to determine the usefulness of the different awareness mechanisms included in the COLLECE system, whose main features are detailed in the following section.

### 3. A collaborative programming CSCL system: COLLECE

The COLLECE (*COLL*aborative *E*dition, *C*ompilation and *E*xecution of programs) system [2] allows users to edit a program or code fragment, to compile it and to run it collaboratively. Up to now, the languages supported have been Java and C. Because the system is primarily used for teaching-learning purposes, two different actors are recognized: teacher and student. The teacher defines the work sessions and arranges the users participating in them by using management tools. A session is defined by name, type, file containing the formulation of the problem to be solved and schedule in which the session has to be carried out.

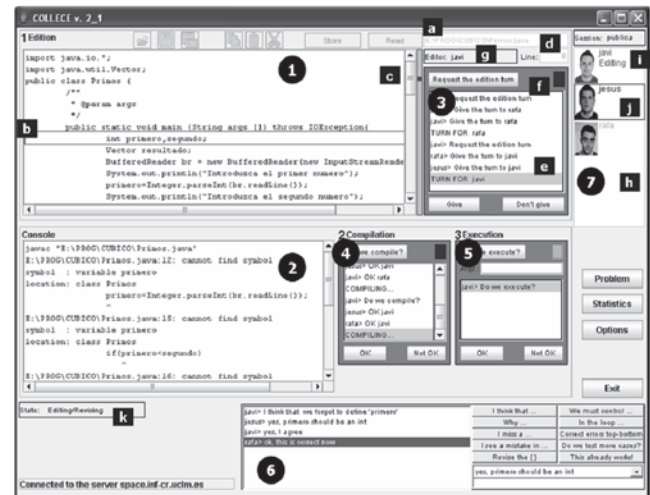


Figure 1. The COLLECE user interface.

Source: [2].

In order to carry out the programming tasks, an explicit collaboration protocol must be followed. First, the students create a program using the collaborative editor (Fig. 1, ①). They are then able to compile the program, receiving a list of compilation errors (Fig. 1, ②). Finally, they can execute the program providing that a compiled program is available. Iterations are possible between these three tasks. However, despite this script, the students are free to make their own decisions on when to edit, compile and execute, as well as to decide who is responsible for each task. To do so, coordination tools are available in the workspace to regulate the navigation through the collaboration protocol.

Such coordination processes are modeled with a simple protocol of actions extracted from language. In order to regulate the edition turn assignment (Fig. 1, ③), we identified the following acts: *Request* the edition turn, *Give* and *Don't give*. With these acts, a user can request the edition turn, and his/her fellow users can express his/her agreement or disagreement. When all the users in the group agree, the assignment is made. Similar actions are used for coordinating when to compile and when to execute the program (Fig. 1, ④ and ⑤, respectively). These coordination tools support multiple proposals, that is to say, proposals coming from more than one user. As a result, lists containing the historical proposals are necessary as they enable a user to select the proposal to which he/she wants to respond.

The communication during the tasks takes place by means of a structured chat (Fig. 1, ⑥). This chat is structured because it offers a pre-established set of communication acts, aimed at providing explicit communication acts that encourages the users' participation, reducing the writing load and focusing the users on the task. Apart from the so-called structured messages, the chat also provides the users with free text messages and the possibility of selecting one of the last messages sent in order to reuse it.

In the final COLLECE user interface four main areas are identified: the edition area at the top (Fig. 1, ① and ③), the console in the middle (Fig. 1, ②, ④ and ⑤), the chat at the

bottom (Fig. 1, ⑥) and the session panel on the right (Fig. 1, ⑦). Two functions of the system allow users to consult the formulation of the problem as well as the compilation statistics. The former shows a textual description of the problem to be solved. The latter displays an ordered list of compilation errors and their frequency, so that the students are aware of their more frequently made mistakes.

Besides coordination and communication tools, awareness support is also available in COLLECE. COLLECE deals with the problems of awareness by providing a number of mechanisms to provide information about people, their state and their actions. Specifically, awareness in COLLECE is made possible by means of a number of elements: (i) session panel (Fig. 1, h); (ii) global state (editing, compiling or executing) (Fig. 1, k) and individual state (Fig. 1, i); (iii) tele-pointers, in the form of a colored rectangle drawn around the source code line (Fig. 1, b); (iv) lists of interactions (Fig. 1, e); (v) semaphores (Fig. 1, f); (vi) beeps, when actions occur; (vii) users' position in the source code (Fig. 1, c); and (viii) other mechanisms (Fig. 1, a, d, g and j) such as rectangles and labels to highlight the user and show some elements of information.

The system, developed using Java technology, operates on client/server architecture. The data management as well as the synchronization services for implementing the synchronous collaboration is centralized on a server, whereas the distributed clients (the users executing the system) access the system from a web page.

As was stated in the introduction, COLLECE has been evaluated several times and from different points of view. However, most times the source of information used has been one of a subjective nature. That is, the evaluation has been based on the opinion of students or software developers, questionnaires being the most commonly used technique. Therefore, in this work we propose to complement those evaluative works with additional information of a more objective nature that may be collected during the collaborative edition activity. Thus, in this evaluation we will combine techniques such as questionnaires about subjective perception, heuristic evaluation, testing and automatic logging techniques, retrospective thinking aloud (RTA) and, lastly, eye tracking techniques applied in the context of a usability laboratory.

#### 4. An empirical evaluation of COLLECE

In this section we are going to describe the details of the experience carried out to evaluate the different elements of awareness support included in COLLECE. We have focused on evaluating the *usefulness* for the users of each one during a session of collaborative programming. In order to achieve this, we have used several sources of information. Next, we are going to describe the sample that took part in this experience, as well as the task they had to perform. We will then talk about the design of the experience and the results obtained in it.

##### 4.1. Participants

Ten subjects took part in the experience. All of them were students on the *Systems for Collaboration* course: a subject in the fifth year of Computer Science studies of at the University of Castilla-La Mancha (UCLM). All of them voluntarily agreed to participate in the experimental task.

##### 4.2. Experimental task

The task to be carried out by the participants consisted in modifying a Java program provided to them at the beginning of the session. The program made use of the ICE (*Internet Communication Engine*) framework in order to create some client and server threads, so that the task had an intermediate complexity. Participants had a maximum time of 15 minutes to finish the activity. Five groups of two students were created randomly.

##### 4.3. Laboratory settings and equipment

The experience was carried out at the Usability Lab, owned by the CHICO research group at the UCLM. The laboratory includes, besides the common resources for any computer lab, the proper equipment for usability and accessibility testing of interactive systems: eye tracking testing equipment, several testing and interview rooms (equipped with cameras, microphones and a PA system) and an observation room for monitoring tests. The equipment used for eye tracking was a Tobii X60 model<sup>1</sup>. In order to design, carry out and subsequently analyze the eye tracking session, Tobii Studio 3.0.2 software was used.

Before performing the final evaluation, a *pilot test* was carried out. Four professors and researchers participated in it. As a result of the pilot test, some eye tracking testing conditions which can interfere with the session were controlled. Thus, the testing room was prepared to carry out the final test. This phase allowed us to decide which eye tracking measurements to consider in the final test and how to interpret of each of them.

During the experimental task, two computers were used, one for each member of the pair. Both computers were connected to the Internet. Even when both users were in the same room, they could not see the screen of the other member. Moreover, they were not allowed to talk to each other. Instead, they had to use the communication and coordination tools that are integrated in COLLECE. As such the scenario of distributed collaborative programming to which COLLECE gives support was, therefore, more accurately recreated. One member of the group used the computer that had been equipped with the *eye tracking* device, whereas the activity of the second member was recorded by means of a camera pointing at his/her screen (Fig. 2). Both recordings (the one by the eye tracker and the video recording) were synchronized.

<sup>1</sup> <http://www.tobii.com>

#### 4.4. Experimental procedure

During the development of this empirical study three stages were followed: filling the pretest, intervention or test phase (realization of the experimental task) and posttest. Each pair of participants was summoned at different times to perform the task. The maximum duration of the test for each group was 15 minutes. The methodological recommendations of Nielsen and Pernice [25] were followed for the design and further development of eye tracking tests.

#### 4.5. Data collection techniques

Data from the experiments were gathered using the following techniques:

- **Screen and video recording.** The subjects' monitor screens were recorded. Also, all interactions with the application involving the subjects in the shared workspace were captured. COLLECE includes a module for the analysis and recording of the collaborative editing process. This module allows us to make an automatic *log* of the main interactions performed by workgroups and calculating frequencies of use of the main functionalities of the system. Examples of such interactions included programming events (e.g. editing, compilations, executions), communicative events (e.g. text messaging), and coordination activities (e.g. turn changes).
- **Questionnaires.** The subjects were asked to fill out several questionnaires. Before proceeding with the

experimental task, participants filled out the pretest in paper form. This questionnaire aimed to determine their user profile, for which several items that should be scored on a Likert scale (1-5) were included. Subjects indicated their level of agreement or disagreement with eight statements, which were designed to measure their level of programming knowledge and level of expertise in Java and ICE; their level of theoretical knowledge on collaborative systems and the techniques for supporting awareness; and finally, his/her experience in the use of collaborative tools, collaborative programming tools and the use of the COLLECE tool.

Then, students scored the level of *perceived usefulness* (PU) and *intention to use* (ITU) of each of the awareness mechanisms included in the COLLECE system (as described in Section 3) on a scale of 1 to 5. These last aspects can be measured by applying the **TAM evaluation framework** (*Technology Acceptance Model*) proposed by Davis [26]. TAM is one of the most widely accepted theories among information system researchers to study the system-acceptance behavior of users [27]. TAM was the first model to mention psychological factors affecting computer acceptance. In this work we have adapted some of the questions proposed by this framework in order to determine the subjective perception of students about the use of the different awareness elements supported by COLLECE.

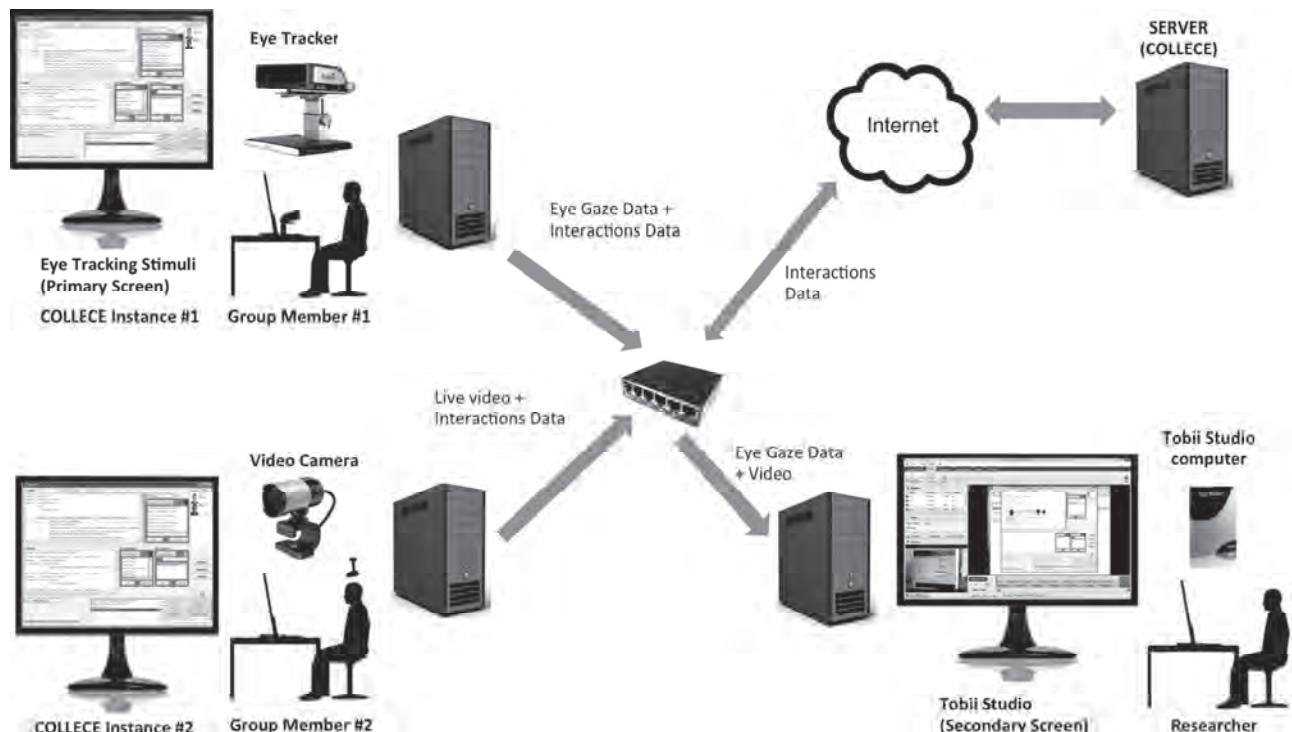


Figure 2. Overall scheme of the experiment settings.  
Source: The authors.

Once the pairs of students finished the modification and extension of the program task, they went on to individually complete the **posttest**. In this last phase, students had to score, using the same scale that was supplied before the test (adapted from the TAM evaluation model), the *perceived usefulness* (**PU**) of the main awareness elements supported by COLLECE, but considering, in this case, their use during the realization of the experimental task.

Finally, and taking into account the profile of the participants (students from the *Systems for Collaboration* course), the ten participants adopted the role of experts in groupware user interfaces and moved on to perform a **heuristic evaluation** of the COLLECE system, making use of the dimensions and sub-dimensions that the framework of Gutwin and Greenberg includes [22]. This last questionnaire included twelve questions. Each question offered the experimental subjects a choice of five alternative answers ranging from 1, “very poor support” to 5, “very good support”. The purpose of the five-point scale questionnaire was to determine the support provided by COLLECE in terms of workspace awareness. In Table 1, the questions included in this last questionnaire are shown.

- **Eye tracking.** After the pretest was completed, the pairs of students moved on to the test or **intervention phase**. Before beginning, the eye tracking device was calibrated for one of the members of the pair. It must be noted that not all people can participate in a task of this type. This is because there are problems with calibration when the participant uses bifocal glasses, contact lenses or if the lighting conditions are not appropriate. These factors affect the reliability and validity of the data obtained, and, as such, subjects who use vision aids should be eliminated from the final sample. The Tobii Studio software allows us to identify problems during the tracking of the subjects by showing a percentage that indicates the precision and quality of the samples obtained. In the study conducted almost all participants had an accuracy level of about 90%, so it was not necessary to remove any of them from the final sample.

Table 1.  
Dimensions, sub-dimensions and questions proposed by the Gutwin and Greenberg framework.\*

| Dimension | Sub-dimension  | Questions                                                         |
|-----------|----------------|-------------------------------------------------------------------|
| Who       | Presence       | Is anyone in the workspace?                                       |
|           | Identity       | Who is participating? Who is that?                                |
|           | Authorship     | Who is doing that?                                                |
| What      | Action         | What are they doing? What are their current activities and tasks? |
|           | Intention      | What goal is that action part of?                                 |
|           | Artifact       | What object are they working on?                                  |
|           | Changes        | What changes are they making?<br>Where are changes being made?    |
|           | Activity Level | Are they active in the workspace?                                 |
|           |                | How fast are they working?                                        |
| Where     | Location       | Where are they working?                                           |
|           | Gaze           | Where are they looking?                                           |
|           | View           | What can they see?                                                |
|           | Reach          | What can they reach?                                              |

Source: Adapted from [22].

In an eye tracking session we can extract a large number of metrics that can be interpreted such as measures of interest, cognitive load, emotional arousal, etc. As we have mentioned above, we are interested in measuring the *usefulness* of the different mechanisms for supporting awareness included in the COLLECE user interface. The two metrics provided by the eye tracker device to measure user interest or attention in a certain area of the image (AOI) are the *number of fixations* (**#Fij**) and the *inspection time* of an AOI. Since in the activity solved by the students there was no time limit, it is more appropriate to consider, instead of absolute times, relative times, i.e. the *percentage of inspection time* (**%Insp**) spent by each subject to inspect each of the representations with respect to the total time devoted to analyzing the entire image.

- **Observation.** The experiments were closely monitored by an observer placed in the control room with the support of observation monitors.
- **Retrospective Thinking Aloud (RTA).** As we have mentioned above, an eye tracking metric can be interpreted in different ways. Hence, it is important to attempt to supplement eye tracking data with additional information gained from the participants about their experiences during the activity. To decide upon the final interpretation of each metric, it is useful to apply a retrospective thinking aloud (RTA) session, which is commonly used for usability testing. In this method, once the tasks were completed by participants, they replayed the eye tracking session again and verbalized their experiences while doing the tasks. The application of such method helped us to determine the most suitable interpretation for the metrics gathered during the eye tracking session.
- **Interview.** Also, we used some open-ended questions in interviews, the purpose of which were to ascertain the opinion of participants about the strengths and weaknesses of the COLLECE system, focusing mainly on its user interface and its awareness support. Also, students could make proposals to improve the user interface of the system.

#### 4.6. Results and discussion

In this section we analyze and interpret all the information gathered throughout the task. As noted, we obtain values from different sources. Some of them are of an objective nature (total time taken to perform the task and the metrics provided by the eye tracker), while others are obtained from the questionnaires provided (level of knowledge, perceived usefulness, intention to use, etc.).

In Table 2 we show the values relative to the **profile** of the users who participated in the task. The mean values of the responses given by the participants are shown. As we can see in the table, participants had little experience in the use of the tool ( $M = 1.70$ ), but had an average understanding of the theoretical foundations of CSCW ( $M = 2.80$ ) and *awareness* ( $M = 2.60$ ). Most of them believed that they were good at programming ( $M = 3.90$ ) and the use of the Java language ( $M = 4.00$ ), but not a very high level of knowledge in ICE ( $M = 1.60$ ).

Table 2.  
Profile of participants in the empirical study.

|                                                                             | Score*             |
|-----------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| Level of knowledge in programming                                           | 3.90 (0.57)        |
| Level of knowledge in Java                                                  | <b>4.00 (0.82)</b> |
| Level of knowledge in ICE                                                   | 1.60 (0.52)        |
| Theoretical level of knowledge about collaborative systems                  | 2.80 (0.63)        |
| Theoretical level of knowledge about awareness techniques                   | <b>2.60 (0.84)</b> |
| Level of practical experience in the use of collaborative tools             | 2.80 (0.63)        |
| Level of practical experience in the use of collaborative programming tools | 1.90 (0.88)        |
| Level of practical experience in the use of COLLECE                         | <b>1.70 (0.82)</b> |

\* We show the mean and, in parentheses, the standard deviation.  
Source: The authors.

Table 4.  
Ratings of the awareness elements of COLLECE (TAM framework)\*\*

| Area of Interest (AOI)   | Perceived Usefulness (PU) - Pretest* | Intention To Use (ITU) - Pretest* | Perceived Usefulness (PU) - Posttest* |
|--------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| AOI-Session Panel        | <b>4.50 (0.71)</b>                   | <b>4.50 (0.71)</b>                | <b>4.50 (0.85)</b>                    |
| AOI-Editor               | 4.20 (1.03)                          | 4.30 (1.06)                       | 4.30 (0.82)                           |
| AOI-Multi-user scrollbar | 4.00 (1.33)                          | 3.70 (1.34)                       | 4.40 (1.35)                           |
| AOI-Semaphores           | <b>4.50 (0.71)</b>                   | 4.30 (0.82)                       | <b>4.50 (0.71)</b>                    |
| AOI-Global state         | 3.90 (0.88)                          | 3.80 (1.03)                       | 3.50 (0.97)                           |
| AOI-Code Line            | <b>4.50 (0.71)</b>                   | 4.40 (0.70)                       | 3.30 (1.64)                           |

\* We show the mean and, in parentheses, the standard deviation.

\*\* Values for  $n=10$  participants.

Source: The authors.

Although, as discussed in Section 3, COLLECE includes a great deal of awareness elements, we will focus our analysis only on some of them. We defined six areas of interest (AOI) in the user interface of COLLECE, corresponding with six of the awareness mechanisms enumerated in Table 3.

Table 4 shows the ratings that the ten participants gave the main awareness techniques, before (pretest) and after (posttest) of the experimental task, according to the dimensions of the **TAM evaluation framework** [26]. The two dimensions that we want to contrast are those that measure the *perceived usefulness* (PU) and *intention to use* (ITU). Considering the answers given by users in the pretest, we can see that what most of them consider as most useful (PU). What they think they will consult more (ITU) is the session panel, the number of the line of code being edited by another group member and semaphores, which allow them to coordinate and make decisions. Comparing the responses given on the pretest to the posttest we can see that, once the task was completed, users still considered the session panel and semaphores as the most useful elements (PU) ( $M = 4.50$ ). However, they believed the line number on which another group member is working was not useful during the activity ( $M = 3.30$ ). As for the multi-user scrollbar, its evaluation in terms of usefulness improves once participants have passed the test phase.

Table 3.  
Definition of the areas of interest (AOI) associated with the main elements of awareness of COLLECE.

| Area of Interest         | Awareness support mechanisms included in COLLECE                                                                                                                                                                                                        |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AOI-Semaphores           | Visual indicator in the coordination tools so that the users can easily perceive (with a green light) when and where there are other users' proposals still awaiting an answer.                                                                         |
| AOI-Multi-user scrollbar | Multi-user scrollbar shows the local user's position and remote users' positions in the source code at the same time. The viewport of each user is represented in multi-user scrollbars as a colored bar locating on the right-hand side of the window. |
| AOI-Session Panel        | Visualization of the users who are participating in the programming activity, identified by means of a specific color.                                                                                                                                  |
| AOI-Editor               | Visual information about who is editing.                                                                                                                                                                                                                |
| AOI-Global state         | Visual indicator pertaining to the current state of the activity (editing, compiling or executing).                                                                                                                                                     |
| AOI-Code line            | Visual indicator pertaining to the number of the code line being edited.                                                                                                                                                                                |

Source: The authors.

Table 5.  
Some use and interaction counts (automatic logging module of COLLECE).

| Session ID | #TC | #Comp | #Exec | #MessInter | #Contributions different to "I think..." |
|------------|-----|-------|-------|------------|------------------------------------------|
| sc_exp_a   | 4   | 2     | 1     | 29         | 5                                        |
| sc_exp_b   | 1   | 1     | 0     | 12         | 2                                        |
| sc_exp_c   | 2   | 2     | 0     | 9          | 1                                        |
| sc_exp_d   | 4   | 5     | 3     | 28         | 4                                        |
| sc_exp_e   | 3   | 2     | 0     | 34         | 7                                        |

Source: The authors.

As it is stated in Section 4.5, COLLECE includes a module for recording all the interactions produced during the collaborative editing process. The utility of this information is greater the larger the sample and number of tasks performed by users are; however, this information is not particularly significant in this first evaluation, given the small number of groups participating in the activity. Still, this module allowed us to record the number of exchanged messages (#MessInter) by the five working groups, the number of compilations (#Comp), executions (#Exec) and turn changes (#TC) made by users (Table 5). This module also allowed us to verify that the groups did not make proper use of the *sentence openers* included in the *structured chat*. They used, in most cases, the opener "I think ..." to start their contributions in chat. This behavior, identified in other previous studies, calls into question the utility of incorporating the *structured chat* in COLLECE and, particularly, in the task under consideration.

We will now move on to discuss the results and **metrics** obtained using the eye tracker device. In this case we can only comment on the data for the five participants whose behavior was recorded by the eye tracker. Most metrics calculated during an eye tracking session are calculated from *fixations*. The two metrics to determine the level of *interest* and therefore *usefulness* of a particular part of the interface are [7]: the *number of fixations on an AOI (#Fij)* and the *percentage of total inspection time spent looking a certain AOI (%Insp)*. The calculated durations and times are measured in seconds. In Table 6 we can see the values of all these metrics for the six areas of interest defined in the COLLECE user interface.

Table 6.

Metrics provided by the eye tracker device\*\*

| Area of Interest (AOI)-awareness | Number of fixations per AOI (#Fij)* | Percentage of time spent on AOI (%Insp)* |
|----------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------|
| AOI-Session Panel                | <b>26.00 (17.82)</b>                | <b>0.52 (0.31)</b>                       |
| AOI-Editor                       | 16.20 (10.43)                       | 0.41 (0.30)                              |
| AOI-Multi-user scrollbar         | 13.20 (13.66)                       | 0.35 (0.38)                              |
| AOI-Semaphores                   | 11.40 (8.17)                        | 0.16 (0.10)                              |
| AOI-Global state                 | 5.60 (2.41)                         | 0.10 (0.06)                              |
| AOI-Code Line                    | <b>2.00 (2.35)</b>                  | <b>0.03 (0.03)</b>                       |

\* We show the mean and, in parentheses, the standard deviation.

\*\* Values for  $n=5$  participants (whose behavior was registered by the eye tracker).

Source: The authors.

Considering the values calculated for each AOI (Table 6), we see that the most consulted element is the session panel (greater number of fixations and percentage of time inspecting this element). These metrics coincide with the participants' subjective assessment in the TAM questionnaire (Table 7), since it was considered to be the most useful element (PU) and with more intention to use (ITU) ( $M = 4.80$ ). According to calculated metrics, the elements which were consulted less by the participants (which were dedicated less inspection time) were the indicator of the global state and the line number on which the other member of the group is working (Table 7). Indeed, in the posttest these were the least valued elements (the valuation of PU decreases for both elements in relation to the rating given to them in the pretest) (Table 7).

Finally, as discussed in Section 4.5, the students were asked to rate the support provided by the COLLECE user interface to each of the dimensions included in the **framework of Gutwin and Greenberg** [22]. In Table 8 we can see the values assigned to each of them. Participants considered the support to dimension "who" of COLLECE was very good, mainly emphasizing the assessment of the sub-dimension *identity* ( $M = 4.70$ ). This information is displayed in the session panel of the application, which, as has been shown, is the most consulted element (highest %Insp) and considered most useful (high value of PU) by participants in the activity. As for the dimension "what", that defines the action being done by other group members and what objects are being manipulated, was assessed positively, although not as much as the previous dimension. As for the sub-dimensions relating to "what", those sub-dimensions that refer to *changes* being made by members of the group ( $M = 4.30$ ) and what *artifacts* were performed ( $M = 4.00$ ) were the most valued. The one that indicates the *level of activity* ( $M = 2.80$ ) was considered as less supported by the COLLECE interface. The dimension "where" was considered the worst supported by the system. In fact, the sub-dimensions that were scored the worst were those that refer to where the other group members are looking. That dimension is not supported by COLLECE (nor by most existing groupware systems), since eye tracking equipment would be necessary to record such information and transmit it to other group members. This is the idea behind recent works dealing with *gaze transfer* in the context of groupware systems and even in contexts of collaborative programming [28,29].

Table 7.

Ratings of the awareness elements of COLLECE (TAM framework)\*\*

| Area of Interest (AOI)   | Perceived Usefulness (PU) - Pretest* | Intention To Use (ITU) - Pretest* | Perceived Usefulness (PU) - Posttest* |
|--------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| AOI-Session Panel        | <b>4.80 (0.45)</b>                   | <b>4.80 (0.45)</b>                | <b>4.60 (0.89)</b>                    |
| AOI-Editor               | 4.00 (1.22)                          | 4.00 (1.22)                       | 4.00 (1.00)                           |
| AOI-Multi-user scrollbar | 3.60 (1.67)                          | 3.60 (1.67)                       | 3.80 (1.79)                           |
| AOI-Semaphores           | <b>4.80 (0.45)</b>                   | 4.60 (0.55)                       | <b>4.60 (0.55)</b>                    |
| AOI-Global state         | 4.00 (1.00)                          | 4.00 (1.00)                       | 3.00 (1.00)                           |
| AOI-Code Line            | 4.40 (0.89)                          | 4.20 (0.84)                       | 3.60 (1.95)                           |

\* We show the mean and, in parentheses, the standard deviation.

\*\* Values for  $n=5$  participants (whose behavior was registered by the eye tracker).

Source: The authors.

After completion of the test phase and posttest, students watched the recordings made during the experimental task, thus performing a **retrospective thinking aloud** (RTA) session, which sought to ascertain the impressions of the participants regarding the COLLECE system. A brief **interview** was then conducted with participants. This phase allowed for the identification of which were considered to be the strengths and weaknesses of the system and possible suggestions for improvements. Among the elements that were most valued by the participants is the support to coordination based on the assignment of turns and, among the most criticized, the *structured chat*. Also several participants suggested improving the identification of *where* the other member of the group is editing. Although this information is visually shown by the "AOI-Code Line", perhaps its location at the interface, its visualization format or size is not ideal, since, as has been found, despite being one of the elements that was better valued in intention to use (ITU) in the pretest, it was less focused on by students (%Insp) and considered to be less useful for the task (PU in posttest). Participants also proposed including an additional audio channel, to display the numbering of the lines of code in the shared context (in the source code) and to increase the flexibility of the decision-making policy, which in the current version of COLLECE is based on consensus of all group members. This latest enhancement will be of particular interest when the number of members of each group is greater than two.

Table 8.

COLLECE's support given to the awareness dimensions and sub-dimensions of the Gutwin and Greenberg framework.\*

| Dimension | Sub-dimension  | Score*             |
|-----------|----------------|--------------------|
| Who       | Presence       | <b>4.50 (0.85)</b> |
|           | Identity       | <b>4.70 (0.67)</b> |
|           | Authorship     | <b>4.50 (0.71)</b> |
| What      | Action         | 3.60 (1.07)        |
|           | Intention      | 3.30 (1.16)        |
|           | Artifact       | <b>4.00 (0.94)</b> |
|           | Changes        | <b>4.30 (0.95)</b> |
|           | Activity Level | 2.80 (1.14)        |
| Where     | Location       | 3.50 (1.43)        |
|           | Gaze           | <b>2.90 (1.20)</b> |
|           | View           | <b>2.90 (1.20)</b> |
|           | Reach          | 3.30 (1.42)        |

\* We show the mean and, in parentheses, the standard deviation.

\*\* Values for  $n=10$  participants.

Source: The authors.

## 5. Concluding remarks and future works

In this work we have evaluated COLLECE, a system that provides support to distributed collaborative programming. Unlike previous evaluations, the work carried out combines several techniques for the evaluation of multiuser interactive systems. Thus, we have comprehensively applied the following techniques: inspection (heuristic evaluation), subjective (questionnaires, interviews) and objective (automatic logging) inquiry, as well as testing in a usability lab (RTA, eye tracking and recording of the use). While checklist-based heuristic evaluation is a technique usually found in the literature [21], the use of eye tracking techniques applied to the evaluation of awareness support is a more original.

We are aware of the small sample size in this first study, so the results obtained should be considered as preliminary. The size is mostly due to the difficulty of analyzing dynamic information collected when applying techniques of eye tracking. Therefore, as a continuation of this work, we are considering replicating this experiment with a bigger sample, in order to obtain some more concluding results. Another line of continuation we expect to address is the possibility of incorporating the technique of *gaze transfer* in a collaborative system and testing its use as a technique for awareness support [24]. This is feasible, as we own the hardware that may be necessary in order to carry it out.

## Acknowledgements

This work has been partially supported by the coordinated project EDUCA-Prog, of the Ministerio de Ciencia e Innovación (Spain) (TIN2011-29542-C02-02), the CYTED Project (Net 513RT0481) and the Government of Castilla-La Mancha's (JCCM) Gite-Learn Project (PEII-2014-012A). The authors also want to thank the UCLM students who took part in the experience for their collaboration.

## References

- [1] Greif, I., Computer-supported cooperative work: A Book of Readings. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann, 1988.
- [2] Bravo, C., Duque, R. and Gallardo, J., A groupware system to support collaborative programming: Design and experiences. *Journal of Systems and Software*, 86 (7), pp. 1759-1771, 2013. DOI: 10.1016/j.jss.2012.08.039
- [3] Bravo, C., Redondo, M.A., Verdejo, M.F. and Ortega, M., Framework for process and solution analysis in synchronous collaborative learning environments. *International Journal of Human-Computer Studies*, 66 (11), pp. 812-832, 2008. DOI: 10.1016/j.ijhcs.2008.08.003
- [4] Dourish, P. and Bellotti, V., Awareness and coordination in shared workspaces, *Proceedings of the Conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, pp. 107-114, 1992. DOI: 10.1145/143457.143468
- [5] Gallardo, J., Molina A.I., Bravo, C., Redondo, M.A. and Collazos, C.A., An ontological conceptualization approach for awareness in domain-independent collaborative modeling systems: Application to a model-driven development method. *Expert Systems with Applications*, 38 (2), pp. 1099-1118, 2011. DOI: 10.1016/j.eswa.2010.05.005
- [6] Nielsen, J. and Pernice, K., Técnicas de eye tracking para usabilidad Web. ANAYA Multimedia, 2010.
- [7] Poole, A. and Linden, J.B., Eye tracking in human-computer interaction and usability research: Current status and future prospects. Pennsylvania: Idea Group, Inc, 2005.
- [8] Carroll, J.M., Neale, D.C., Isenhour, P.L., Rosson, M.B. and McCrickard, S.D., Notification and awareness: synchronizing task-oriented collaborative activity. *International Journal of Human-Computer Studies*, 58 (5), pp. 605-632, 2003. DOI: 10.1016/S1071-5819(03)00024-7
- [9] Stefik, M., Bobrow, D.G., Foster, G., Lanning, S. and Tatar, D., WYSIWIS revised: Early experiences with multiuser interfaces. *ACM Transactions on Office Information Systems*, 5 (2), pp. 147-167, 1987. DOI: 10.1145/27636.28056
- [10] Gutwin, C., Roseman, M. and Greenberg, S., A usability study of awareness widgets in a shared workspace groupware system., *Proceedings of the ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, pp. 258-267, 1996. DOI: 10.1145/240080.240298
- [11] Gallardo, J., Molina, A.I. and Bravo, C., A framework for the design of awareness support in collaborative situations of implicit interaction, *Proceedings of the 13th International Conference on Interacción Persona-Ordenador - INTERACCION*, 2012. DOI: 10.1145/2379636.2379643
- [12] Johnson, P.M., Reengineering inspection: The future of formal technical review. *Communications of the ACM*, 41 (2), pp. 49-52. 1998. DOI: 10.1145/269012.269020
- [13] Shen, H. and Sun, C., RECIPE: A prototype for Internet-based real-time collaborative programming, *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Annual International Workshop on Collaborative Editing Systems*, 2000.
- [14] Jo, C.H. and Arnold, A.J., A portable and collaborative distributed programming environment, *International Conference on Software Engineering*, pp. 198-203, 2003.
- [15] Devide, J., Meneely, A., Ho, C-W, Williams, L. and Devetisikiotis, M., Jazz sangam: A real-time tool for distributed pair programming of a team development platform, *Proceedings of Infrastructure for Research on Collaborative Software Engineering (IRECoSE)*, 2008.
- [16] Rubin, J. and Chisnell, D., *Handbook of usability testing. How to plan, design and conduct effective tests*. Indianapolis, Indiana: Wiley Publishing, Inc., 2008.
- [17] Pinelle, D. and Gutwin, C., Groupware walkthrough: Adding context to groupware usability evaluation, *Proceedings of the 2002 SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 455-462, 2002. DOI: 10.1145/503376.503458
- [18] Baker, K., Greenberg, S. and Gutwin, C., Heuristic evaluation of groupware based on the mechanics of collaboration, *Proceedings of the 8th IFIP working conference on engineering for human-computer interaction (EHCI)*, pp. 123-140, 2001. DOI: 10.1007/3-540-45348-2\_14
- [19] Convertino, G., Neale, D., Hobby, L., Carrollo, J. and Rosson, M., A laboratory method for studying activity awareness, *Proceedings of the Third Nordic Conference on Human-Computer Interaction*, pp. 313-322, 2004. DOI: 10.1145/1028014.1028063
- [20] Röcker, C. and Magerkurth, C., Privacy and interruptions in team awareness systems. *Universal access in human computer interaction. Coping with Diversity Lecture Notes in Computer Science Volume 4554*, pp. 273-283, 2007.
- [21] Antunes, P., Herskovic, V., Ochoa, S.F. and Pino, J.A., Reviewing the quality of awareness support in collaborative applications. *Journal of Systems and Software*, 84, pp. 146-169, 2014. DOI: 10.1016/j.jss.2013.11.1078
- [22] Gutwin, C. and Greenberg, S., A descriptive framework of workspace awareness for real-time groupware. *The Journal of Collaborative Computing*, 11 (3-4), pp. 411-446, 2002. DOI: 10.1023/A:1021271517844
- [23] Hennessey, C., Framework for colocated synchronous dual eye tracking. *Proceedings of the Dual Eye-Tracking in CSCW (DUET)*, 2012.
- [24] Mueller, R., Helmert, J.R., Pannasch, S. and Velichkovsky, B.M., Following closely? The effects of viewing conditions on gaze versus mouse transfer in remote cooperation. *Proceedings of the Dual Eye-Tracking in CSCW (DUET)*, 2011.

- [25] Nielsen, J. and Pernice, K., Eyetracking methodology. How to conduct and evaluate usability studies using eyetracking. Nielsen Norman Group, 2009.
- [26] Davis, F.D., User acceptance of information technology: System characteristics, user perceptions and behavioral impacts. *International Journal of Man-Machine Studies*, 38 (3), pp. 475-487, 1993. DOI: 10.1006/imms.1993.1022
- [27] Legris, P., Ingham, J. and Colletette, P., Why do people use information technology? A critical review of the technology acceptance model. *Information and Management*, 40 (3), pp. 191-204, 2003. DOI: 10.1016/S0378-7206(01)00143-4
- [28] Bednarik, R. and Shipilov, A., Gaze cursor during distant collaborative programming: A preliminary analysis, *Proceedings of the Dual Eye-Tracking in CSCW (DUET)*, 2011.
- [29] Bednarik, R., Shipilov, A. and Pietinen, S., Bidirectional gaze in remote computer mediated collaboration: Setup and initial results from pair-programming, *Proceedings of the ACM 2011 conference on Computer supported cooperative work*, pp. 597-600, 2011. DOI: 10.1145/1958824.1958923

**AI. Molina**, received her degree in Computer Science in 2002 and her PhD. in 2007 from the University of Castilla-La Mancha, Spain. She has since joined the Escuela Superior de Informática (College of Computer Science and Engineering) at the University of Castilla-La Mancha, Spain. In addition to teaching, her main interests are in the field of new information technologies applied to collaborative learning and computer-human interaction.

**J.Gallardo**, received his BSc., MSc. and PhD. from the Universidad de Castilla-La Mancha, Spain. He has been an assistant professor at that University since 2011, and is now a professor at the Universidad de Zaragoza, Spain. He has been a member of the CHICO research group at the Universidad de Castilla-La Mancha, Spain, since 2006. His research interests include CSCW, groupware development and the application of model-driven engineering to such fields.

**M.A. Redondo**, has a PhD. in Computer Science in 2002 and is an associate professor at the Escuela Superior de Informática (College of Computer Science and Engineering) at the University of Castilla-La Mancha, Spain. His research interests focus on the fields of new Information Technologies applied to Computers in Education and Computer-Human Interaction.

**C. Bravo**, received his MSc. in Computer Science in 1996, from the Universidad de Sevilla, Spain and his PhD. in 2002 from the Universidad de Castilla-La Mancha, Spain. He joined the Computer Science Engineering Faculty of the Universidad de Castilla-La Mancha, Spain in 1998. His research interests include computer-support for collaborative learning, model-driven approaches to groupware engineering, and collaborative programming.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN  
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería  
de Sistemas e Informática

Oferta de Posgrados

Especialización en Sistemas  
Especialización en Mercados de Energía  
Maestría en Ingeniería - Ingeniería de Sistemas  
Doctorado en Ingeniería- Sistema e Informática

Mayor información:

E-mail: [acsei\\_med@unal.edu.co](mailto:acsei_med@unal.edu.co)  
Teléfono: (57-4) 425 5365

## A design process for balanced educational video games with collaborative activities

Natalia Padilla-Zea <sup>a,b</sup>, Nuria Medina-Medina <sup>a</sup>, Francisco L. Gutiérrez-Vela <sup>a</sup>, José R. López-Arcos <sup>a</sup>,  
Patricia Paderewski <sup>a</sup> & Carina S. González-González <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Dpto. Lenguajes y Sistemas Informáticos y CITYC, Universidad de Granada, Granada, España. {npadilla, nmedina, fgutierr, patricia, jrlarco}@ugr.es

<sup>b</sup> Universidad Internacional de la Rioja, Logroño, España. natalia.padilla@unir.net

<sup>c</sup> Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática y Arquitectura y Tecnología de Computadores, Universidad de La Laguna, Tenerife, España. cjgonza@ull.es

Received: February 13<sup>th</sup>, 2015. Received in revised form: March 10<sup>th</sup>, 2015. Accepted: September 29<sup>th</sup>, 2015

### Abstract

The efficiency of educational video games could be improved through the use of a specific development method that allows them to keep both their educational and recreational goals and maintains their playability. Accordingly, we present a process for the incremental design of educational video games with collaborative activities based on Software Engineering principles. This process intends to make the specification and design of educational and recreational contents easier, and also ensures a balance between educational and playful components. To support this methodology, we present a pilot authoring tool that implements our design process.

**Keywords:** Digital Game-Based Learning; Methodologies; Educational Video Games Design; Computer-Supported Collaborative Learning.

## Proceso de diseño para videojuegos educativos con actividades colaborativas

### Resumen

El uso de un método de desarrollo específico para videojuegos educativos que facilite la definición de objetivos pedagógicos y lúdicos podría mejorar la eficiencia instructiva de este tipo de aplicaciones, sin perder su jugabilidad. Con esta intención, en este trabajo se presenta un proceso de diseño incremental que aplica principios de Ingeniería del Software para generar videojuegos educativos con actividades colaborativas. Siguiendo dicho proceso, la especificación y diseño de contenidos educativos y de juego es más sencilla y permite garantizar el equilibrio entre los componentes educativos y de juego. Complementariamente, se presenta un prototipo de una herramienta de autor que implementa la metodología propuesta.

**Palabras clave:** Aprendizaje basado en juegos; Metodologías; Diseño de videojuegos educativos; Aprendizaje colaborativo soportado por computador.

### 1. Introduction

In a society in which Information and Communication Technologies (ICT) have been incorporated into every aspect of our daily life, it can be assumed that they can also be incorporated into educational environments. Actually, e-learning has now been incorporated into many disciplines, both for formal and informal learning processes (e.g., [1]). In

addition, it is also well known that learning by playing has benefits for students, from kindergarten to postgraduate students, due to the motivation that this way of instruction provokes in learners [2]. For this reason, the studies about Game-Based Learning (GBL) [3] have been revised, in order to be applied together with ICT. This has brought binding results in the form of a powerful learning tool that emerged under the denomination of Digital Game-Based Learning

(DGBL) [4,5], which reinforces the benefits of the game with 3D graphics, high interactivity, monitoring and student adaptation, etc.

Moreover, collaborative learning and, in particular, computer-supported collaborative learning (CSCL) have been widely proven to improve learning processes due to, among other factors (e.g., [6]), the additional motivation experienced by students when they work together (e.g., [7,8]).

A specific application of DGBL is educational video games that intend to teach educational contents embedded in a recreational and interactive story [9]. The educative content of an Educational Video Game (EVG) can be implicit or explicit. Our research focuses on the first type, in which the educative activities are hidden, and are disguised as play activities. As such, we intend to fully take advantage of using ICT, DGBL and CSCL.

Furthermore, several experiences, such as [10,11], or a more in-depth example in [12], have revealed that balancing the educational and entertaining contents in this kind of video game is very important to obtain the expected results. Additionally, Egenfeldt-Nielsen [13] has stated that many educational games fail to integrate game and educational goals, which reduces the game's effectiveness in terms of fun or learning, depending on the aspect that is less developed.

In the review undertaken in [12] we found that when teachers use a commercial game to involve children in a new content or to practice some aspect of the curriculum, they have to work hard. As Felicia [14] explains in the *handbook for teachers*, they have to know, among other factors, what video games exist, what the game is about and how they can use it to teach in their classrooms. Consequently, the chances to include this kind of video game as educational tools is reduced, since many teachers have less knowledge or interest in making the required effort. On the other hand, video games especially designed to teach are usually too educative in nature, and the game is then little more than a *virtual textbook*. In these cases, children quickly detect that those games are different from the video games they have at home, and this makes motivation much lower.

In conclusion, we found that educational video games could be improved through the use of specific methods that allow the definition of educational goals maintaining playability [15]. Thus, we have defined a design process for educational and collaborative video games based on Software Engineering principles, such as incremental construct, the *divide and conquer* approach, graphic modeling, etc. In order to validate the proposed process, we have developed a pilot authoring tool that is focused on the components that support the design activities, both educational and entertaining.

In summary, this paper's main contribution is presenting a design process specifically for educational video games which:

- Involves the teacher in the video game design.
- Defines educational goals, tasks and curricula,
- Defines game stages, levels and activities,
- Interrelates educational tasks and play activities
- Models individual students: learning outcomes and game challenges, and

- Models student groups: collaboration, cooperation and communication.

We also propose a pilot authoring tool based on this design process, which is:

- Intuitive, by using graphical notations,
- Simple, by separating issues into the four phases proposed, and
- Evolutionary, by allowing backtracking at every phase.

The rest of paper is structured as follows: In section 2, we analyze related works on general recommendations and guidelines for the design of educational video games. Section 3 describes the proposed design process, dividing its development into four different phases. In section 4, we present the pilot authoring tool to design educational video games with collaborative activities. Finally, in section 5, main conclusions obtained from this study and further works are outlined.

## 2. Related works

It is well known that video games are widely present in the majority of households in developed countries, either PC games, console games or many other devices. Moreover, some years ago, there were different experiences with the introduction of using video games as educational tools, for example, the ones presented in [14] or [16].

In this paper, our focus is on the particular case of these educational video games, which are especially designed to teach some educational content by playing. Nevertheless, using video games as an educational tool, although they have not been especially designed with an educational intention, has several benefits for students [14, 17]: reducing boundaries from the real world and allowing *different worlds*

Table 1. Capabilities development from an educational standpoint

|                       |                                                                                                                              |              |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Personal Development  | Increases self-esteem                                                                                                        | [18, 19]     |
|                       | Increases motivation to learn                                                                                                |              |
|                       | Increases knowledge and control over self-learning process                                                                   |              |
|                       | Increases curiosity and creativity                                                                                           |              |
|                       | Increases perseverance, understanding of rules and response to frustrations                                                  |              |
| Social Development    | Creates a sense of belonging to a group                                                                                      | [20, 21]     |
|                       | Improves attitudes towards teachers and classmates                                                                           |              |
|                       | Fosters collaboration, cooperation and competition                                                                           |              |
|                       | Fosters social learning                                                                                                      |              |
|                       | Fosters situated learning: learning occurring not only in the individual mind, but embedded in the social and cultural world |              |
| Cognitive Development | Fosters abstract thinking                                                                                                    | [16, 20, 21] |
|                       | Fosters critical thinking and decision making                                                                                |              |
|                       | Fosters incidental learning                                                                                                  |              |
|                       | Allows exploratory and proactive learning: learning by doing                                                                 |              |
|                       | Fosters learning self-regulating                                                                                             |              |
|                       | Fosters planning strategies to achieve goals                                                                                 |              |
|                       | Increases capability to understand cognitive maps, simulations, pictograms, and so on.                                       |              |
|                       | Fosters learning retention in the long term                                                                                  |              |

Source: [16,18-21]).

Table 2. Summary of proposals studied

| Proposal               | General or Educational Purpose | Aimed at teachers of developers | Explicit separation of educational and recreational aspects | Collaborative Aspects | Adaptive Aspects |
|------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------|
| «e-Adventure» [23]     | Educational                    | Developers                      | ✗                                                           | ✗                     | ✓                |
| WEEV [24]              | Educational                    | Developers                      | ✗                                                           | ✗                     | ✓                |
| Guidelines [25]        | Educational                    | Developers                      | ✗                                                           | ✓                     | ✗                |
| Layered framework [26] | Educational                    | Developers                      | ✗                                                           | ✓ (groups)            | ✗                |
| Puzzle-it [27]         | Educational                    | Developers                      | ✗                                                           | ✓                     | ✓ (in progress)  |
| General Structure [28] | Educational                    | Teachers                        | ✓                                                           | ✗                     | ✗                |
| TAT [29]               | Educational                    | Teachers                        | ✓                                                           | ✗                     | ✓                |

Source: [23-29]

to be accessed, which allows students to exercise their fantasy; fostering instant repetition and trying again in a safe environment; promoting the mastery of skills because players can repeat actions until they dominate them; facilitating relationships with other people in a non-hierarchical way; improving hand-eye coordination; reducing reacting times; improving spatial conception, memory, technological understanding; etc. In addition, from an educational standpoint, video games allow personal, social and cognitive capabilities to be developed. Table 1 classifies these benefits in the three aforementioned categories. The history of video games shows us that its evolution is marked by the constant search for more entertainment and ease of use. This search must be addressed both from a technological and methodological standpoint, otherwise the solution will be incomplete.

On the technological level, two fundamental aspects are considered [22]: 1) the search for immersion through increasingly realistic environments, as well as new, interactive and more natural elements; and 2) the creation of specific devices that facilitate interaction, simulating real elements and offering new gaming experiences.

On the methodological level, we think it is unavoidable to use a design process that ensures the quality of the video game. In our opinion, one only technological approach, will lead to video games that are empty of substance, both educational and fun.

While some guidelines for creating educational video games do exist, we believe there is a need for a more comprehensive proposal for the development process, including both entertainment and educational aspects. In this regard, we agree with the proposals stated in [23], where some of the limiting factors for educational video games and emerging trends are highlighted. Consequently, the work proposed in this paper is intended to address some of the issues that the previously mentioned work highlights, in particular the *list of addressed limits and trends*:

1. The teacher plays a very important role both in the design process and in the play time. Thus, the design process must be focused on teachers, rather than on game developers, in order to promote teachers' involvement in the design, development and use of educational video games.

2. Video games designed by using the proposed design method allow for elements to be reused and are flexible in order to provide each student with a more suitable experience.
3. Combining our user model and the video game's setup capabilities, in order to be able to adapt the learning experience both from educational and recreational standpoints is very important.
4. Video games designed by using the method proposed allow the teacher to obtain information about how well the student has learnt the educational contents.
5. Collaborative activities are included and information about relationships occurred during the play time is recorded.

In order to compare our approach with others existing in the literature, Table 2 summarizes some of the main features of the related works studied, paying attention to five main aspects: if the proposal is for general purpose or specific for education, if the proposal is aimed at teachers or developers, if it separates educational and recreational aspects explicitly, if it includes collaborative elements and if the resulting video game can be adapted to each student. We explain them in more detail after the table.

Undoubtedly, one of the most important proposals is the «e-Adventure» platform [23], which integrates methodology, architecture and author tool to support the design process [30]. This framework is mainly focused on the development of educational tools, although it can also be used for non-educational video games, but it does not incorporate collaborative aspects [31].

As an extension of this system, [24] we propose the WEEV methodology, which is especially designed for educational video games. This methodology uses three main elements to design a game: a) defining actors, b) defining the world in which the game takes place; and c) creating the story by a graphical representation to describe the flow of the game. We find that the focus should be moved to teachers, who still are unaware of using video games as educational tools and, as such, they are not involved in their design and development.

WEEV covers collaboration, showing that there is a gap in the market in the specific field of educational video games with collaborative activities. To fill this space, we present a set of guidelines from previous works [25]. These guidelines are based on the five pillars of cooperative learning [33]:

positive interdependence, individual accountability, face-to-face promotive interaction, social skills and group self-analysis. In this work, we present a set of recommendations to foster each of these elements in order to facilitate activity design in the game.

More focused on a technical level, but with a softer definition of a development process, another proposal to make the design of serious games easier can be found in [27]. This proposal consists of a framework with three layers that divide the problem of game design into several steps. The first step focuses on the conceptual level, where aspects related to the gameplay, student features, teacher requirements, and game management are solved. Each of these aspects is modeled using a subsystem on a conceptual level. The second part of the framework deals with the technical level, including a set of tools to design and develop the game. The practical level is tackled in the last step, including a set of recommendations to reduce complexity in the game structure, gather student feedback and give a representation of the game elements.

Higher education is possibly the educational level where more educational video games can be found. However, these video games usually focus their attention on the educational content to be taught, which usually involves a lack of playful elements, which contradicts the Egenfeldt-Nielsen's balancing theory [13]. This occurs, for example, in [27], in which the platform development Puzzle-it is proposed. Although it is still a work in progress, authors propose four main modules for the architecture in order to separate different aspects of game development. The authoring module deserves special attention, because it is expected to offer authoring tools to teachers. However, although the *manual* part of this module is intended to be used by teachers, the contents they have to define are not related to education. In contrast, they have to design and / or create scenarios and rules related to their didactic plans. In our opinion, teachers should be given authoring tools for educational contents rather than game contents.

For her part, Sauvé [28] presents a pedagogical-centered proposal to make the design of on-line educational video games easier, allowing for the creation of different games all starting from the same general structure. To do this, several tools are provided to fix particular parameters in the game, generate the rules, create the educational contents, define criteria for winning and ending the game, and revise the game process.

More aligned with our proposal, we find the work of [29], who includes an authoring tool for teachers that intends to facilitate the design of educational contents to be included in the educational video games supported by Affective Teachable Agents [34]. In that work, authors propose to divide the knowledge to be taught in goals. In addition, these contents are characterized according to different difficulty levels. After this process has been undertaken, lists of tasks are added to transitions between goals. Although we agree with the need to structure the educational content similarly to the way it is structured in traditional classes, we find this particular structure to be

too difficult to maintain. The process of splitting the content should be easier and more intuitive for teachers, as well as facilitating the association between goals and tasks without, for example, repeating tasks in several transitions.

As stated in [35], the teachers and parents' opinion about using video games as educational tools is quite positive and they accept that video games can be a powerful tool to improve learning processes. In addition, we found that the most useful information from that report is the explanation provided by teachers about why video games are having problems in being incorporated into classrooms, as well as the proposals they have in order to overcome these obstacles: a) integrating the use of video games as educational tools as part of teacher training; b) having practical guides to use video games as educational tools (as proposed in [14]); c) fostering teachers' involvement in educational video games design; d) fostering collaboration between editorial and video games industry; and e) promoting the use of video games as governmental educational tools.

Table 3. Design Process Summary.

|   |                                               |       |                                                                                                                                                                               |
|---|-----------------------------------------------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Knowledge Design                              | Areas | Knowledge Areas [D1.1]                                                                                                                                                        |
|   | Educational Design                            | Goals | Educational Goals [D1.2]                                                                                                                                                      |
|   | Educational Tasks and Activities Design       |       | Educational Tasks [D1.3]<br>Educational Activities [D1.4]                                                                                                                     |
|   | Educational Model Design                      | Model | Educative Itinerary [D1.5]                                                                                                                                                    |
| 2 | Game Basic Design                             |       | Definition [D2.1]<br>Interaction features [D2.2]                                                                                                                              |
|   | Video Game Challenges Design                  |       | Game Challenges [D2.3]                                                                                                                                                        |
|   | Game Stages and Levels Design                 |       | Game Stages [D2.4]<br>Game Levels [D2.5]<br>Game Activities [D2.6]                                                                                                            |
|   | Game Model Design                             |       | Game Itinerary [D2.7]                                                                                                                                                         |
| 3 | Relating Educational and Entertaining Content |       | Inter-level relationships [D3.1]                                                                                                                                              |
| 4 | Characterizing the User                       |       | User model: general perspective [D4.1]<br>User model: educational perspective [D4.2]<br>User model: game perspective [D4.3]<br>User model: interaction perspective [D4.4]     |
|   | Characterizing the Group                      |       | Group model: general perspective [D4.5]<br>Group model: educational perspective [D4.6]<br>Group model: game perspective [D4.7]<br>Group model: interaction perspective [D4.8] |

Source: The authors

With the proposal we present in this paper (detailed in section 3), we intended to make advancement in several of the topics presented in this section. Specifically, this proposal fosters the teachers' involvement in the design process since the educational content design will be the first step in video game development and, of course, they are experts in this. In addition, in order to provide a comprehensive framework to design educational video games with collaborative activities, this proposal: a) allows collaborative activities to be designed; b) provides mechanisms to separately design both educational and entertainment elements; c) allows a relationship between educational and recreational contents in order to relate achievements in the game to achievement at an educational level; and d) offers modules for teachers and for developers, each of them intended for their particular field of knowledge, because which contents are explicitly separated.

### 3. Design process for educational video games: our proposal

In a similar way to the design of other kinds of software, video game design should respect the principles of re-use and re-engineering of elements. It is therefore important to consider both educational and entertaining elements separately so that curriculum contents and games can be maintained more easily (item 2 in the *list of addressed limits and trends*). In addition, from the teacher perspective, by keeping elements on different levels they can be analyzed and dealt with independently from one another. And, this separation makes it possible to ascertain whether a problem that a student has during the learning process is related to the game activity, the educational concept, or to both (item 1 in the list).

We introduce collaborative activities into educational video games in order to enrich the learning processes (item 5). For this reason, it is convenient to incorporate monitoring to analyze the interaction between students, for example in group composition. To facilitate the subsequent analysis of information related to collaboration, we propose a set of models to record student and group information (items 3 and 4). These models are also used to perform adaptations [40].

The design process that we propose has four incremental and iterative phases, which are summarized in Table 3.

#### 3.1. Phase 1: Educational Content Design

As previously stated, the focus of an EVG should be placed on educational content to be taught and subsequently be wrapped with the different layers of the game. For that reason, as other authors have also suggested, for example, [36] and [37], the design process proposed here starts with the Educational Content Design. This phase must be performed collaboratively by teachers and the entire educational team, and is composed of four activities, each of which generates one or several design documents. These activities, in order of execution, are: 1) Knowledge Areas

Design, 2) Educational Goals Design, 3) Educational Tasks and Activities Design and 4) Educational Model Design.

Defining the Knowledge Areas (document [D1.1]) consists of identifying what each of the areas will be, for example, a subject or a specific set of contents of a subject. For higher education, we could define the subject "Algebra I", while in primary school an area would be "Mathematics 2º". The educational team is free to define the knowledge areas in the way that they see fit. Information to be included about Knowledge Areas is: name of the area, educational age to which it is appropriate and a general description of its contents. This first activity establishes the educational context of the video game.

Then, for each of the previously created areas, a set of Educational Goals ([D1.2]) must be completely defined. To fully describe an Educational Goal it is necessary to specify enough information to understand the contents and how they must be achieved. Therefore, for each goal we must include the name, the Knowledge Area to which it belongs, transverse Knowledge Areas (other secondary Knowledge Areas which are partially dealt with), recommended educational age (in the range of the age specified in the Knowledge Area), a natural-language description explaining the content that the student will learn, and a set of tasks whose realization contributes to achieving that goal. Once we have created all the Educational Goals, we have to define which goals are in the highest level of this structure and which are classed as sub-goals of these.

After defining Educational Goals, we have to define Educational Tasks ([D1.3]) and Activities ([D1.4]), which will allow for these goals to be achieved. Information to be specified about tasks and activities is very similar to the information detailed for goals, except that, in this case, the key is not what the student will learn but how they will learn. Again, relationships between tasks and activities are established in order to specify hierarchical relations between them. Thus, this information completes a tree of educational goals, tasks and activities, in which each level is somehow related to the previous and the next one.

The last activity in phase 1 is delimiting the Educational Model. The Educational Model is a sub-set of the goals and tasks of a specific Knowledge Area. By means of an Educational Model, the teacher determines the educational content to be learnt through the video game in a particular case, such as training for exams for advanced students or first approximation for novice users. The document from this activity is called Educative Itinerary ([D1.5]) and it comprises a selection of tasks that students must complete to achieve each goal included in the Educational Model. The teacher can include mandatory and optional tasks. In each Educational Model, several alternative itineraries can be included in order to provide the student with different sets of tasks to learn a concept. Information detailed at this stage is: the Knowledge Area that will be taught; recommended educational age; prior knowledge needed in order to understand the content expressed in terms of Educational Goals and Tasks and the relations between them.

### 3.2. Phase 2: Entertaining Content Design

The second phase in this design process is intended to construct the entertainment content. This phase is divided into four main activities: 1) Basic Game Design, 2) Video Game Challenges Design, 3) Stages and Levels Design, and 4) Game Model Design. In order to maintain homogeneity in the design process, the recreational aspects are structured in a similar way to the educational content. This results in a similar hierarchical tree where the Game is composed of a set of Challenges, which can be achieved by means of a set of Stages and Levels.

The first activity in designing a video game is to define its general characteristics (Basic Game Design): 1) the game story (narrative) according to the content that teachers want to teach (for example, a war game with landscapes of countries for teaching the history of the Second World War), the video game genre (platform, social games, graphic adventure, role playing games, etc.), the device which will run the video game (PC, PlayStation, Nintendo DS, Xbox 360, etc.), multimedia elements and interaction modes (important if, for example, the student has a hearing impairment, in order to select a game without sound effects ([D2.1]); and 2) how characteristics of group learning will be applied (competitive, collaborative, or cooperative) ([D2.2]).

The design of Video Game Challenges ([D2.3]) is fairly similar to the design of Educational Goals in activity 2 of phase 1, but it focuses on game confrontations rather than instructive objectives. To define these challenges, designers use elements in the main story of the video game, including: a name for the challenge, a natural language description explaining what the player must do, relations to other challenges included in the game and a Stages and Levels sub-model, which concrete game activities to achieve the goal.

The last step in the Entertaining Content Design is to define which Video Game Stages ([D2.4]), Levels ([D2.5]) and Activities ([D2.6]) are needed to overcome each of the challenges. The programming of Stages and Levels for a challenge is called Video Game Itinerary ([D2.7]). A stage is described as each of the tasks that a player has to complete in order to overcome the challenge. A stage can be divided, recursively, into more sub-stages (if is complex), or be composed of levels. The same applies to levels, which are composed of sub-levels or activities. The activity is the atomic unit in the video game (for example, jump on a cloud, run down a block, grab a gun, etc.).

In order to define Stages and Levels completely, designers must also specify: the name for the stage or level, which must be descriptive; a natural language description of the stage or level; the number of players; the difficulty; the type of stage (strategy, puzzle, etc.); if it has group activities, if they are simultaneous (if all levels in the stage must be completed at the same time by group members), ordered (if levels are linked through an order relation and one level cannot be started until the previous one is completed) or non-ordered (if all levels in the stage can be completed in any order); resources available and resources needed to complete the stage or level (for example, a key to open a door, a potion

or a game tool) and the sub-stages and Level Model in order to divide the stage into easier parts.

Once the Challenges, Stages and Levels in the video game are designed, all that remains is to decide which Video Game Itineraries ([D2.7]) will be available, similarly to the Educational side.

### 3.3. Phase 3: Relating Educational and Entertaining Content

In the third phase, relationships between elements in both levels (educational and entertaining) are established. Relations established in this phase determine the students' evaluation process, since relating a level or stage in the video game to a task or activity in the educational side means that completing the stage in the video game is approximately equivalent to learning the content in the educational task or activity. When we relate a Stage or Level in the Video Game to an Educational Task or Activity, a relation called Inter-level relationship ([D3.1]) is established between them.

Each Educational Task or Activity must be related to one or more Video Game Stages or Levels. However, not all Stages and Levels have to be related to a Task or Activity, since it is possible (and also necessary) that video games include Stages or Levels just for fun in order to maintain the interest and motivation of players.

Graphically, the result of this phase can be seen in Figure 1. In this figure, the lower level (LE) corresponds to Educational Contents (Educational Level). Oval elements in this level represent Educational Tasks or Activities, called  $Te_i$ , shown in Figure 1. As can be seen, relationships between these oval elements are established to squared elements from the Educational Level itself. These last elements represent Educational Goals and they are related to tasks and activities that contribute to overcome them with certain flexibility. As can be seen in Figure 1, relationships between tasks and goals are labeled with numbers and symbols. Numbers represent different paths to overcome a goal, and symbols represent if

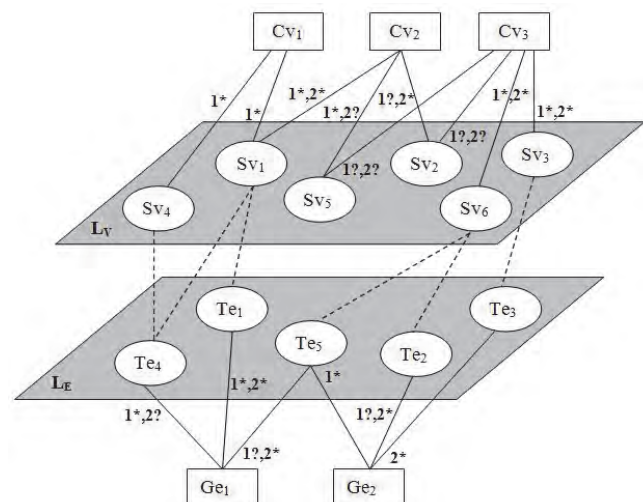


Figure 1. Relationships established between Educational and Entertaining Levels (Inter-level relationship, [D3.1]).

Source: The authors

the task or activity is optional (?) or mandatory (\*). Moreover, since a task can be mandatory in one path but optional in another, 1\* means that this task is mandatory in path number 1, but 1? means that the task is optional in this path. In the example in Figure 1 there are two paths for each Educational Goal ( $Ge_1$  and  $Ge_2$ ). For the Educational Goal  $Ge_1$  in path number 1,  $Te_1$  and  $Te_4$  are mandatory but  $Te_5$  is optional; and in path number 2,  $Te_1$  and  $Te_5$  are mandatory and task  $Te_4$  is optional. This means that to achieve the Educational Goal  $Ge_1$ , a student must succeed in the tasks  $Te_1$  and  $Te_4$  or  $Te_1$  and  $Te_5$ , with the remaining task being optional. Contents at this level have been defined in phase 1, but they could be modified in this phase according to the needs of a particular game.

The upper level (LV) corresponds to the Video Game Level, and it includes contents related to the video game being designed. Similarly to Educational Level, oval elements represent Video Game Stages and Levels, while squared elements represent Video Game challenges. Relationships between elements at Video Game Level also represent Stages and Levels that contribute to overcoming Video Game Challenges. Labels placed in the relationships have the same meaning as Educational Level.

Finally, relationships between both levels are represented in Figure 1 by dashed lines. For example, to learn content in  $Te_4$ , Levels  $Sv_1$  and  $Sv_4$  have to be played. On the other hand,  $Sv_6$  contributes to learning contents both in  $Te_2$  and  $Te_5$ . And,  $Sv_2$  and  $Sv_5$  have been included only for fun. As we can see, several situations can be represented by using the Inter-level Relationship.

### 3.4. Phase 4: Relating User Modeling

In the last phase, user modeling is performed, including information from the users and groups who will play the video game. These models are the internal representation of the individual users and users' groups inside the video game. And, in order to perform a far better adaptation, the users must be modeled from all possible perspectives. Since a user is a person, a student, a player and a member of a team, four perspectives are taken into account in our user models:

- General perspective: includes data that characterizes the student or group in a generic way. For example, name, age and gender of a person and number of members or date of creation for a group);
- Educational perspective: registers information that is useful in order to personalize the learning process a student or group will face. For example, some attributes in this perspective can be: proposed goals, faced tasks, etc.;
- Game perspective: details student's or group's characteristics and preferences in the game process. For example, in which devices the student has experience, what kind of game tasks he or she prefers, or, type of tasks in which the group obtains better results.
- Interaction perspective: shows how the student works when faced with a group task. In order to perform an analysis

based on Social Networks (SNA) (e.g. [38]), we here record information about messages that students send and receive. However, information in the individual and group models is different. In the individual model, we only record the number of messages sent and received by the students, classified according to a previously defined messages categorization [39]. In this categorization, different categories designed on the Johnson and Johnson [33] proposal are presented: communication, collaboration and coordination. However, information for groups is focused on messages exchanged within the group, also classified according to our messages categorization [39]. For that reason, we store three matrices one for each of the categories (communication, collaboration and coordination), where the position  $ij$  represents the number of messages that member  $i$  has sent to member  $j$ .

This set of attributes is a general profile to maintain data about users. However, for each particular video game, more specific attributes can be added; as well as some of those previously explained can also be disabled if they are not needed.

During operation of the video game, some adjustments will be made based on the user model's attributes. Some of these adaptations can be seen in the Table 4.

The full design process is formally supported by a set of models presented in [40]. These models are divided into four categories: 1) Models for educational content, 2) Models for entertaining content, 3) General Goals and Task Model, and 4) User Modes. Of course, each of these sets of models is elaborated during the corresponding phase of the design process. complete and organize the required information. We currently have an earlier prototype of that tool.

## 6. Authoring tool to support the design process

Applying any design process can be difficult for inexperienced users. For this reason, we intend to develop a software tool to assist both teachers and designers to

Table 4. Some adaptations supported in the user modeling phase.

| Perspective | Adaptation                                                                                             |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| General     | Choosing an avatar with which the player feels identified.                                             |
|             | Choosing a visual interaction mode if the player has auditory dysfunctions.                            |
| Educational | Determining the educational itinerary that better fits the previous student's knowledge.               |
|             | Choosing a different educational itinerary if student's achievements are not as good as expected.      |
| Game        | Determining the game itinerary that better fits player preferences.                                    |
|             | Changing the game itinerary if student's abilities cannot match the difficulty of challenges proposed. |
| Interaction | Creating groups according to characteristics and motivation of members.                                |
|             | Suggesting a role change between group members if results for the group are not positive.              |
|             | Changing a student from one group to another.                                                          |

Source: The authors

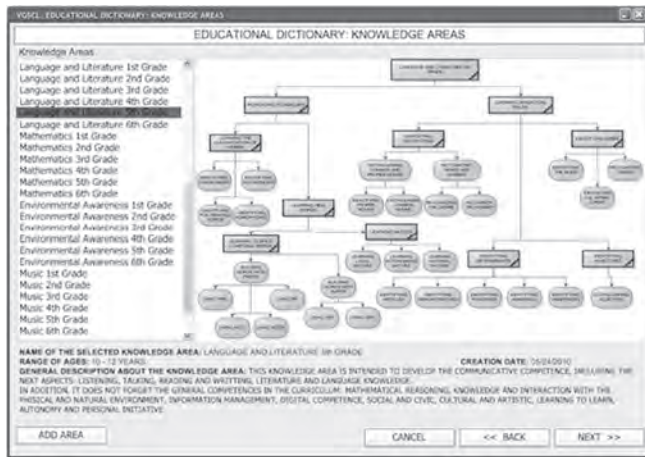


Figure 2. Summarizing the Knowledge Area.  
Source: The authors

The tool we are proposing supports the complete design process and allows teachers and designers to include information about every item by typing information and dragging-and-dropping elements to relate each other. For example, supposing we have a Knowledge Area (phase 1, document D1.1) called “Language and Literature 5th grade”, information about goals, tasks, challenges, etc. is also included by using specific interfaces (phase 1, documents D1.2, D1.3 and D1.4).

Documents D1.1 to D1.4 are defined, and the information can be seen summarized at the bottom of the Fig. 2. This representation shows the current state of the Knowledge Area and presents Educational Goals, Tasks and Activities as well as relationships between them. Goals are represented as squares (for example, “Learning Grammar Rules”) while tasks and activities are represented as ovals (for example, “Recognizing the Genre”). When an element in this graphical representation is selected, its information is displayed in the lower side of the screen: name, range of ages, general description and, in general, the most relevant information, depending on the item that is selected.

In addition, a friendly interaction mechanism has been included in order to relate these elements (Knowledge Areas, Educational Goals and Educational Tasks), as is shown in Fig. 3.

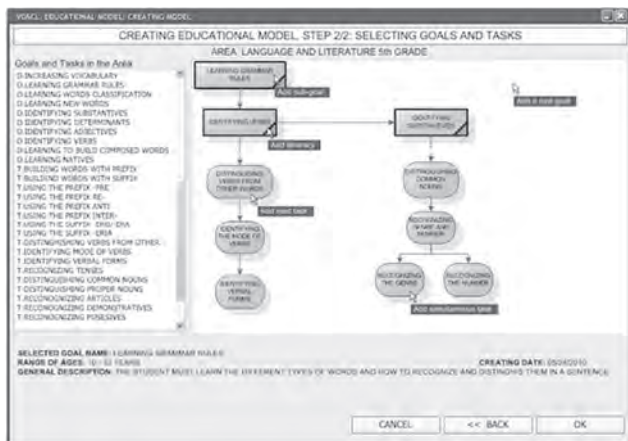


Figure 3. Building a new Educational Model.  
Source: The authors

Fig. 3 illustrates how goals and tasks in the area “Language and Literature 5th grade” are being selected to complete a specific itinerary, which will form an Educational Model. In this figure, we can see “Step 2/2”, since it is the last step in defining the Educational Model (phase 1, document D1.5). The previous step, “Step 1/2”, had the objective of identifying the Educational Model by basic information such as name, description and the Knowledge Area to which it belongs.

In the above screenshot (Figure 3), several options to show how to relate elements are being displayed (only one of them can be accessed in the real tool, by clicking the bottom right of the mouse). For example, the option “Add sub-goal” has allowed the sub-goal “Identifying verbs” to be included in the educational goal “Learning grammar rules”. The option “Add itinerary” has allowed itinerary 1 to be created for the educational sub-goal “Identifying verbs”. Next, with the option “Add next task” the three tasks needed to achieve the sub-goal have been incorporated into the itinerary. Finally, the option “Add a new goal”, which is not represented in any specific element, will allow other educational goals to be included in the Educational Model that is being defined.

In this example, only one itinerary has been created for each of the two educational sub-goals (“Identifying verbs” and “Identifying substantives”). Tasks in each itinerary are defined as sequential or simultaneous. Both options are represented in Figure 3: the first one with the aforementioned option “Add next task” in the “Distinguishing verbs from other words” task and the second one with the option “Add simultaneous task” in the “Recognizing the genre” task. The proposed tool will also support the definition of several Educational Models for a single Knowledge Area and the inclusion of several itineraries for each of the goals in an Educational Model. If several ways to achieve the goal are possible then each of the itineraries will be named using consecutive numbers.

To resolve the second phase of the design process, that is, the entertainment aspects, similar interfaces are used (phase 2, documents D2.1 to D2.5). The third phase, Relating Educational and Entertaining Contents, is then addressed by the prototype in the form shown in Figure 4. The right side of the figure shows the

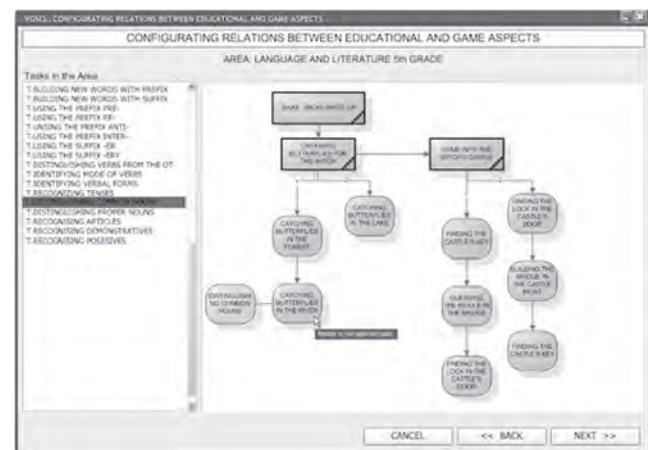


Figure 4. Defining the relations between Educational and Video Game Contents.  
Source: The authors

entertainment contents, represented by means of a tree, where the rectangles represent Challenges and the ovals represent Stages and Levels of the game (leaf nodes are Levels). The left side shows the educational contents, presenting only the Educational Tasks in the current Educational Model (previously created). Teachers and designers work together by selecting a level in the Video Game Level and relating it to a task in the Educational Level. When an educational task is associated to a video game level, the educational task is included on the right side, joined by a line to the video game level and painted in pink to visually distinguish the instruction part from the entertainment part (phase 3, document D3.1).

When this phase has been carried out, the educational video game with collaborative activities will have been completely defined. The fourth and last phase in our design process is to model the users. To do this, personal data of each of the students must be included into the system. This process can be performed manually, but could be also supported by the designed tool. If the teachers want students to train for a specific goal or set of goals, then they can use the tool to assign goals to one or more students or groups in one step, simply by selecting them from the corresponding lists.

## 7. Conclusions and further work

The field of educational video games is being studied by different research groups around the world, for example by [41-45]. Studies have proved that using these kinds of tools is beneficial for students on both a personal and an educational level.

In this work, we have made an in-depth study of the state of the art to compare the strengths and weaknesses in the efforts currently being made to generate truly effective educational games. Consequently, we have argued the main elements that we consider necessary to design and model a learning system supported by educational video games with collaborative activities. Based on these, we have presented a design process specific to educational video games, with two main aims: 1) facilitating the work of the designer, which is in line with the trends proposed in [33]; and 2) involving teachers in the design, and, by doing so, promoting them to use educational video games as learning tools. By using the design process proposed in this paper, teachers and video game designers can obtain more balanced video games, in terms of educational and recreational contents, as they are independently designed and latter combined. Furthermore, features in this design process allow the teacher to maintain a record of educational achievements and group performance.

The design process presented here establishes a methodology that is divided into four phases, each of which is further divided into several steps. As result of each of these steps, we obtain one or more design documents. These documents describe the educational video game from different perspectives: educational objectives, game challenges, communication between players, etc.; and are a key resource in the design, development and subsequent maintenance of the educational video game.

In addition, in order to assist users in using our proposal, we intend to develop a software authoring tool. Thus, we have presented the first prototype in order to facilitate users

understanding of how the design process is applied and to detect weaknesses in the further tool.

Our immediate future work is to refine and implement improvements to obtain the final version of the authoring tool as soon as possible. In addition, although this design process is independent of the platform, we are developing a specific platform based upon it called PLAGER-VG [17], which will integrate the presented tool as a design module. Accordingly, PLAGER-VG will allow for the design, execution and analysis of educational video games with group activities using the proposed models. Having a well defined design process allows the platform to maintain information about the educational progress of students as they use the different games included in the system.

## Acknowledgements

This research was supported by the Ministry of Science and Innovation (Spain) as part of the VIDECO project (TIN2011-26928), the Andalusian Research Program with project P11-TIC-7486 and the Iberoamerican Network (U-CSCL) (project CYTED, 51RT0481).

## References

- [1] Muhlestein, D. and SeungJin, L. Online learning with social computing based interest sharing. In *Knowledge and Information Systems* 26(1), pp. 31-58, 2011. <http://dx.doi.org/10.1007/s10115-009-0265-4>
- [2] Singer, D. G., Golinkoff, R. M., and Hirsh-Pasek, K., Eds., *Play= Learning: How play motivates and enhances children's cognitive and social-emotional growth*, USA. Oxford University Press, 2006.
- [3] Pivec, M., Dziabenko, O. and Schinnerl, I., Aspects of game-based learning, 3rd International Conference on Knowledge Management, 2003, pp. 216-225.
- [4] Prensky, M., Digital game-based learning. *Computers in Entertainment*, 1(1), 2003, pp. 21-21, <http://dx.doi.org/10.1145/950566.950596>
- [5] Papastergiou, M., Digital Game-Based Learning in high school Computer Science education: Impact on educational effectiveness and student motivation. *Computers & Education*, 52(1), 2009, pp. 1-12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compedu.2008.06.004>
- [6] Soller, A., Supporting social interaction in an intelligent collaborative learning system. *International Journal of Artificial Intelligence in Education* 12(1), pp. 40-62, 2001.
- [7] Vizcaíno, A., Contreras, J., Favela, J. and Prieto, M. An adaptive, collaborative environment to develop good habits in programming. *Lecture Notes in Computer Science* 1839, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2000, pp. 262-271.
- [8] Lowyck, J. and Pöysä, J., Design of collaborative learning environments, *Computers in Human Behaviours* 17(5-6), pp. 507-516, 2001.
- [9] Marty, J.C. Hints for Improving Motivation in Game-Based Learning Environments. *Handbook of Research on Increasing Motivation and Learning Through Educational Video Games: Multidisciplinary Approaches*, IGI Global, 2011, pp. 530-549.
- [10] Shabanah, S. S., Chen, J. X., Wechsler, H., Carr, D. and Wegman, E., Designing computer games to teach algorithms, 7th International Conference on Information Technology, 2010, pp. 1119-1126.
- [11] Almonte, J. B., Ramírez, C. G. R., Tugade, R. R. and Atienza, R. O., Implementation of a digital game-based learning environment for elementary education, 2th International Conference on Education Technology and Computer (ICETC), 2010, pp. 208-212.
- [12] Padilla-Zea, N. Metodología para el diseño de videojuegos educativos sobre una arquitectura para el análisis del aprendizaje colaborativo, PhD dissertation, Software Engineering Department, University of Granada, Spain, 2011.
- [13] Egenfeldt-Nielsen, S. What Makes a Good Learning Game? Going beyond edutainment. *ACM Learn Magazine* [Online], 2011. [date

- of reference January 15th of 2015]. Available at: <http://elearnmag.acm.org/archive.cfm?aid=1943210>
- [14] Felicia, P. (Spanish translation of) Digital Games in schools. A handbook for teachers. C. Kearney (Eds.) European Schoolnet, 2009.
- [15] González-Sánchez, J. L., Gutiérrez-Vela, F. L., Montero Simarro, F. and Padilla-Zea, N., Playability: analyzing user experience in video games. *Behavior and Information Technology*, 31(10), 2012, pp. 1033-1054.
- [16] Rosas, R., Nussbaum, M., Cumsille, P., Marianov, V., Correa, M., Flores, P., Grau, V., Lagos, F., López, X., López, V., Rodríguez, P. and Salinas, M. Beyond Nintendo: design and assessment of educational video games for first and second grade students. *Computers & Education* 40(1), 2003, pp. 71-94.
- [17] Gifford, B. R. The learning society: Serious play. *Chronicle of Higher Education*, 7, 1991.
- [18] Griffiths, M. The educational benefits of videogames. *Education and Health* 20(3), pp. 47-51, 2002.
- [19] Gros, B. Digital games in education: the design of game-based learning environments. *Journal of Research on Technology in Education* 40(1), pp. 23-38, 2007.
- [20] Mitchell, A. and Savill-Smith, C. The use of computer and video games for learning-A review of the literature. London: Learning and Skills Development Agency, 2004. [date of reference June 26th of 2014] Available at: <http://dera.ioe.ac.uk/5270/1/041529.pdf>
- [21] Annetta, L. A., Murray, M. R., Laird, S. G., Bohr, S. C. and Park, J. C. Serious games: incorporating video games in the classrooms. *Educause quarterly* 3, pp. 16-22, 2006.
- [22] González, C. and Blanco, F. Designing social videogames for educational uses. *Computers & Education*. Volume 58 Issue 1, January, pp. 250-262, 2012.
- [23] Moreno-Ger, P., Sierra, J. L., Martínez-Ortiz, I. and Fernández-Manjón, B. A documental approach to adventure game development. *Science of Computer Programming* 67(1), pp. 3-31, 2007.
- [24] Marchori, E., Torrente, J., del Blanco, A., Moreno-Ger, P., Sancho, P. and Fernández-Manjón, B. A narrative metaphor to facilitate educational game authoring. *Computers & Education* 58, pp. 590-599, 2012.
- [25] Padilla-Zea, N., González Sánchez, J. L., Gutiérrez, F. L., Cabrera, M. J. and Paderewski, P. Design of Educational Multiplayer Video games. A Vision from Collaborative Learning. *Advances in Engineering Software* 40, pp. 1251-1260, 2009.
- [26] Westera, W., Nadolski, N., Hummel, H. and Wopereis, I. Serious games for higher education: a framework for reducing design complexity. *Journal of Computer Assisted Learning* 24, pp. 420-432, 2008.
- [27] Pranantha, D., Belloti, F., Berta, R. and De Gloria, A. Puzzle-it: An HTML 5 serious games platform for education. *Lecture Notes in Computer Sciences* 7516, Berlin, Germany, Springer-Berlag, 2012, pp. 134-143.
- [28] Sauvé, L. Design tools for online educational games: Concepts and application. *Lecture Notes in Computer Sciences* 5660, Berlin, Germany, Springer-Berlag, 2012, pp. 187-202.
- [29] Ailiya, Miao, C. and Shen, Z., Authoring educational games through affective teachable agent. *Proceedings of the 12nd IEEE Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT'12)*, 2012, pp. 102-104.
- [30] Burgos D., Moreno-Ger P., Sierra J. L., Fernandez-Manjon B. and Koper R. Authoring game-based adaptive units of learning with IMS Learning Design and <e-Adventure>. *International Journal of Learning Technology* 3(3), pp. 252-268, 2007.
- [31] Moreno-Ger, P., Burgos, D., Martínez-Ortiz, I., Sierra, J. L. and Fernández-Manjón, B. Educational Game design for online education. *Computers in Human Behavior* 24(6), pp. 2530-2540, 2008.
- [32] Moreno-Ger, P., Fuentes Fernández, R., Sierra, J. L. and Fernández-Manjón, B. Model-checking for Adventure Video games. *Information and Software Technology* 51(3), pp. 564-580, 2009.
- [33] Johnson, D. W. and Johnson, R. T. Learning Together. *Handbook of Cooperative Learning Methods*. Connecticut: Greenwood Press, 1994.
- [34] Ailiya, Shen, Z., and Miao, C., Affective Teachable Agent in VLE: A goal oriented approach. *Proceedings of the 11st IEEE Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT'11)*, 2011, pp. 110-114.
- [35] Tran, C. D., George, S. and Marfisi-Schottman, I., EDoS: An authoring environment for serious games. *Design based on three models*, 4th European Conference on Game-Based Learning, 2010, pp. 393-402.
- [36] Marfisi-Schottman, I., George, S. and Tarpin-Bernard, F., Tools and methods for efficiently designing serious games. *Proceedings of the 4th European Conference on Game-Based Learning*, 2010, pp. 226-234.
- [37] Narasimhamurthy, A., Greene, D., Hurley, N. and Cunningham, P. Technical Report UCD-CSI-2008-04, Dublin, 2008, 21 P.
- [38] Padilla-Zea, N., González Sánchez, J. L. and Gutiérrez, F. L., Collaborative learning by means of video games. An entertainment system in the learning processes. *Proceedings of the IX IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT)*, 2009, pp. 215-217.
- [39] Padilla-Zea, N., Medina-Medina, N., Gutiérrez Vela, F. L. and Paderewski, P. A Model-Based Approach to Design Educational Multiplayer Video Games. *Technology-Enhanced Systems and Tools for Collaborative Learning Scaffolding. Studies in Computational Intelligence* 350, pp. 167-191, 2011.
- [40] Boyle E., Connolly T., Hainey T. and Boyle J. Engagement in digital entertainment games: A systematic review. *Computers in Human Behavior*, 28, pp. 771-780, 2012.
- [41] Cesarone, B. Video Games: Research, Ratings, Recommendations. ERIC Clearinghouse on Elementary and Early Childhood Education. Urbana, Illinois (U.S.A): ERIC Digest, 1998.
- [42] Del Blanco, A., Torrente, J., Marchiori, E. J., Martínez-Ortiz, I., Moreno-Ger, P. and Fernández-Manjón, B. A Framework for Simplifying Educator Tasks Related to the Integration of Games in the Learning Flow. *Educational Technology & Society*, 15 (4), pp. 305-318, 2012.
- [43] Egenfeldt-Nielsen, S., Smith, J. H. and Tosca, S. P. Understanding videogames. Nueva York: Routledge, 2008.
- [44] Hui-Yin H. and Shiang-Kwei W. Using Gaming Literacies to Cultivate New Literacies. *Simulation & Gaming*, 41(3), pp. 400-417, 2010.
- [45] Padilla-Zea, N., Gutiérrez Vela, F. L. and Medina Medina, N. An architecture to Design Educational Video Games with Collaborative Activities. *IEEE Learning Technology Newsletter*, 12 (1), 2010, pp. 6-8.

**N. Padilla-Zea** received her Ph.D. in computer science in 2011, from the University of Granada, where she works as full-time teacher in the Ceuta Campus (Spain). Her fields of research are related to HCI, more concretely, to educational video games and collaborative learning. She collaborates with several research projects on using video games in learning processes as well as designing efficient educational video games to use in schools. Additionally, she is a member of the Program Committee at different national and international conferences and serves as reviewer for several scientific journals.

**N. Medina-Medina** received her Ph.D. in computer science from the University of Granada (UGR) in 2004. Nowadays, she works as a researcher in the Research Centre for Information and Communications Technologies (CITIC-UGR) and is professor at the Department of Computer Languages and Systems at this Spanish University where she directs a project that implements educational games in Andalusian school classrooms (P11-TIC7486).

**F.L. Gutierrez** (Ph.D., in computer science in 2002) has been a full-time teacher at the University of Granada (Spain) since 1990. He has directed several (national and local) research projects related to human computer interaction and game based learning. Nowadays, he directs the Specification, Development and Evolution of Software (GEDES) research group.

**J.R. López-Arcos** is native of Granada (Spain). He is currently a Ph.D. student and researcher at the University of Granada. He received his M-Sc. degree in software development in 2013 from this University. His research is related to storytelling in video games, narrative contents design and educational video games development.

**P. Paderewski** (Ph.D., 2003) has been a full-time teacher at the University of Granada (Spain) since 1990, where she had received her Ph.D. in Computing. Her fields of research are software architecture, software systems evolution models, cooperative agent-based systems, e-learning, HCI and educative video-games. She is member of the Program Committee at different national and international conferences and has served as reviewer for several international journals.

**C.S. González González**, received her Ph.D. in computer science in 2001 from the University of La Laguna. She is associated professor at the Department of Computer Engineering at the University of La Laguna. Her main focus areas in research are related to human computer interaction (HCI), natural and adaptive interfaces, serious games and gamification in Education and gender in HCI. Also, she has a vast experience in e-learning best practices and LMS systems.

# Impact of web accessibility barriers on users with a hearing impairment

Afra Pascual<sup>a</sup>, Mireia Ribera<sup>b</sup> & Toni Granollers<sup>c</sup>

<sup>a</sup> GRIHO Research Group, Polytechnic School, University of Lleida, Lérida, Spain [apascual@diei.udl.cat](mailto:apascual@diei.udl.cat)

<sup>b</sup> Adaptabit, research group. Department of Information Science, University of Barcelona, Barcelona, Spain. [ribera@ub.edu](mailto:ribera@ub.edu)

<sup>c</sup> GRIHO research group, Polytechnic School, University of Lleida, Lérida, Spain. [toni.granollers@udl.cat](mailto:toni.granollers@udl.cat)

Received: February 18<sup>th</sup>, 2015. Received in revised form: March 16<sup>th</sup>, 2015. Accepted: September 26<sup>th</sup>, 2015

## Abstract

Several user tests were carried out on people with a hearing impairment to evaluate the impact of different web accessibility barriers on two similar web sites, one accessible and the other not accessible. The tests' focus was to analyze users' moods when faced with different accessibility barriers. Results show "complex text" and "multimedia content without text alternative" as the most critical barriers for users with this profile. Our investigation contributes to a better understanding of users when confronting accessibility barriers, and to emphasize the need of web content authors to use plain language and to provide captions and sign language alternatives in video content

**Keywords:** Web Accessibility, barriers, WCAG 2.0, Communicability, Accessible content, Deaf users, hearing impairment, User test.

# Impacto de las barreras de accesibilidad web en usuarios con discapacidad auditiva

## Resumen

Se realizaron pruebas de usuarios a personas con discapacidad auditiva evaluando el impacto que las diferentes barreras de accesibilidad causan en este tipo de usuarios. El objetivo de recoger esta información fue para comunicar a personas que editan contenido en la Web de forma más empática los problemas de accesibilidad que más afectan a este colectivo, las personas con discapacidad auditiva, y así evitar las barreras de accesibilidad que potencialmente podrían estar creando. Como resultado, se observa que las barreras que causan más impacto a usuarios con discapacidad auditiva son el "texto complejo" y el "contenido multimedia" sin alternativas. En ambos casos los editores de contenido deberían tener en cuenta vigilar la legibilidad del contenido web y acompañar de subtítulos y lenguaje de signos el contenido multimedia.

**Palabras clave:** Accesibilidad Web, Barreras, WCAG 2.0, Comunicabilidad, Contenido accesible, Usuarios con discapacidad auditiva, Test de usuarios.

## 1. Introduction

Nowadays, a significant number of Internet users have a high level of digital literacy [1]. However, users with disabilities affecting language acquisition may have problems understanding web content. According to the World Health Organization, more than 5% of the population has a hearing impairment or suffers from hearing loss [2].

Hypacusia, can be classified by different levels

depending on what sounds a person is able to hear: with mild hearing loss the person is able to hear sounds louder than 21 to 40 dB, in moderate hearing loss they hear sounds louder than 40 to 69 dB, in severe hearing loss they only hear sounds above 71 to 90 dB, and in profound hearing loss or deafness they do not hear sounds unless they are louder than 90 dB. People with mild to severe hearing loss are likely to be able to speak clearly and to benefit from hearing aids. People with profound or total hearing loss communicate through lip

reading, and talk by speech or through sign language.

The onset of hearing loss is also important and it can be defined as: (a) prelocutive or prelingual hearing loss, when it appears before the age of two, (b) perilocutive when it appears between two to four years, and (c) postlocutive when it appears at a later stage in life. In both prelocutive and perilocutive hearing loss, speech and language development are hindered. In postlocutive hearing loss, speech can progressively suffer from phonetic or prosodic alterations [3].

When web developers and content authors think about a web site being accessible, they usually think about it being perceivable, and within this requirement, at best they know that video content should have captions. They also think about it being operable or robust, but in most cases they forget the understandable principle from the WCAG guidelines. This principle is paramount for people with language difficulties. Some authors [4],[5] state that Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.0 [6] are not insistent enough on the understandable principle, while they consider it to be the most critical requirement for users with hearing or cognitive disabilities and even for foreign people who have not mastered the language in which the web is written [7]. Globally, 28% of WCAG 2.0 success criteria is related to users with hearing impairments, 66% of them being level A, 17% level AA and 17% level AAA [8].

The user tests presented in this article correspond to the third stage of the research, which is aimed at collecting empirical data related to the moods and the user experience of people with disabilities while they interact with web content that has accessibility barriers. Previous stages include people with cognitive disabilities (first stage) [9] and visual disabilities (second stage) [10], and there is an ongoing user test (fourth and last stage) being conducted with people with motor impairments. All of them browsed the same web content, but different barriers were tested for in each group.

We define "accessibility barrier" as any condition that makes it difficult for people with disabilities or special needs to achieve a goal while they are browsing a website, even if they use the appropriate assistive technology [11]. In contrast to the content with barriers, content with good accessibility improves efficiency and promotes autonomy for users with disabilities [12], increasing their welfare and quality of life [13],[14].

This article collects and analyzes empirical information of a group of users with hearing loss while browsing two websites with similar content but different levels of accessibility. One of the sites was built with many accessibility barriers (NA-site), while the other is completely accessible (A-site). The final aim of the research is to obtain the degree of impact for each accessibility barrier in order to communicate it when an error is detected in a web 2.0 authoring scenario. The focus is on emotions because regular web 2.0 users do not have expertise in technical accessibility [15], and we want them to empathize with their potential users.

Current accessibility evaluation tools offer their results in a very technical language [16], which users without a deep knowledge of accessibility often find difficult to understand.

The authors believe that it is possible to improve error communication by having empathy with the user. We intend to transmit users' experiences to web 2.0 authors when they submit new content in a blog, for example, and they make an error. As an example, when a user embeds a video without captions, instead of saying: "1.2.1. Audio-only and Video-only (Prerecorded): For prerecorded audio-only and prerecorded video-only media, the following are true, except when the audio or video is a media alternative for text and is clearly labeled as such: (Level A)" [6], we will (by means of the interface) tell them "This video does not include captions", and we will show a deaf user saying "Without captions I can not understand it!" With messages like this we will try to improve non-technical authors' understanding and awareness of accessibility needs and problems.

Emotions can be classified by three continuous dimensions [17]: valence, which encompasses values from nice to nasty; activation, ranging from calm to excited; and power, characterized by strong and weak. Primary emotions have positive (joy, happiness, etc.) or negative (anger, fear, sadness, etc.) valence and, depending on the emotion's intensity, its degree of activation will go from "calm" (boring) to "excited" (tense).

There are several techniques for measuring emotions classified into objective and subjective techniques. The objective techniques are mainly designed to analyze the bodily changes of a person, by means of studying facial expressions or measuring bodily reactions, such as heart beat or dilated pupils. According to the James-Lange theory [18], different emotions produce changes in the body that can not be controlled.

The subjective techniques measure the feelings and emotions of a user through questionnaires, interviews and self-reports. They provide information about user experience when performing a specific task. Nevertheless, they are based on a subjective perception and the result may be biased by the user's own interests and desires. Related to this technique, there are two different types of self-reports: verbal and non-verbal. In verbal reports the participant uses words to indicate the perceived emotion, as for example, in [19] and [20]. In non-verbal reports, a set of images representing the variety of emotions are shown to the users, who only have to point out which image represents the particular perceived emotion, for example in [22-24].

Because this last option is easier for deaf users, in our study we have chosen a subjective technique based on non-verbal language.

The article is organized as follows: section 2 introduces the experimental framework used to evaluate users' moods, section 3 details the results and findings ordered by accessibility barrier, and finally, section 4 presents our conclusions.

## 2. Experimental framework

We built two websites using WordPress<sup>1</sup> containing touristic information about a city. The accessible site (A-site<sup>2</sup>) was built following the methodology described in [25], which grants a high level of accessibility when working with

<sup>1</sup> Wordpress. <https://es.wordpress.com/>

<sup>2</sup> A-site: <http://193.144.12.82/accesibilidad/wpB>

Table 1.  
List of tasks, elements and WCAG 2.0 criteria.

| Task                                     | NA-site                                                                                                    | A-site                                |
|------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| T1. Looking up a podcast                 | Non-transcribed audio (WCAG 2.0 success criteria: 1.2.1, 1.2.2, 1.2.3, 1.2.4, 1.2.5, 1.2.9)                | Audio and transcript                  |
| T2. Looking up data in a graph           | Complex image (WCAG 2.0 principle: 3)                                                                      | Simple image                          |
| T3. Looking up data in a data table      | Complex words in a data table (WCAG 2.0 success criteria: 3.1.3, 3.1.4)                                    | Simple text in a data table           |
| T4. Playing a video file                 | Video without captions (WCAG 2.0 success criteria: 1.2.1, 1.2.2, 1.2.3, 1.2.4, 1.2.5, 1.2.7, 1.2.8, 1.2.9) | Video with captions and sign language |
| T5. Looking up information of a monument | Complex text (WCAG 2.0 success criteria: 3.1.3, 3.1.5)                                                     | Simple text                           |

Source: The author

content management systems. The WordPress settings were configured to have the top level of accessibility: we used accessible templates (TwentyTenFive3) and (Accessible-five4), we used raw HTML code when the automatic code was not compliant with accessibility specifications, and we installed extensions to improve accessibility in several elements. We also used an audio plugin (Accessible Audio Player (AAP)5 and an accessible video player (CCPlayer6).

The non-accessible site (NA-site7) was built with the standard settings in WordPress. We used the default template (Twenty Twelve) and we did not install any extension or any additional accessibility feature. The content was added with cut and paste from a word processing application and images were added by dragging them to the WordPress editor.

Before the user test, each web site's level of accessibility was checked against WCAG guidelines using automatic evaluators (eXaminator8 and TAW9) and by a manual review with the WAT10 support on the IExplorer and Web Developer toolbar,11 using Firefox, and following the W3C evaluation methodology [26] guidelines. Taking into account the importance of language [27], we also manually analyzed the complexity of the text and calculated the Flesh-Kincaid Spanish score12. The result was that the NA-site showed many accessibility issues relating to the template and the content added with text editor. It also failed in the HTML and CSS validations13, and it had a 60% (normal text) readability index. In contrast, the A-site did not display accessibility barriers, and it had an 80% (easy to read text) readability index.

We then devised the tasks to be carried out by users, based on barriers affecting people with hearing impairments. In

Table 2.  
User characteristics. W: Woman, M: Man, SL: Signed Language, O: Orally

|        | Id  | Sex | Schooling         | Speak    | Language            | Web Experience       |
|--------|-----|-----|-------------------|----------|---------------------|----------------------|
| Novice | U01 | W   | Elementary school | SL       | Spanish             | From 1 to 5 years    |
|        | U02 | M   | High school       | SL       | Spanish             | From 1 to 5 years    |
|        | U03 | M   | Elementary school | SL       | Spanish             | From 1 to 5 years    |
| Expert | U04 | M   | High school       | SL       | Spanish             | Longer than 5 years. |
|        | U05 | M   | Elementary school | SL       | Spanish and Catalan | Longer than 5 years  |
|        | U06 | M   | High school       | SL and O | Spanish and Catalan | Longer than 5 years  |
|        | U07 | W   | Elementary school | SL       | Spanish and Catalan | Longer than 5 years  |
|        | U08 | W   | Elementary school | SL       | Spanish             | Longer than 5 years  |
|        | U09 | Man | Elementary school | SL       | Spanish             | Longer than 5 years  |
|        | U10 | W   | Elementary school | SL       | Spanish             | Longer than 5 years  |

Source: The author

Table 1 each task is described with its associated content and related WCAG 2.0 success criteria. To create the tasks and decide the elements involved in each of them, we followed the methodology described in [28].

## 2.2. Participants

A total of 14 people participated in the user test, 10 of them with total deafness and 4 with moderate hearing loss. As the results of users with moderate hearing loss were repeated and amplified by users with total deafness, in this article we only include the results of the severely deaf users, as they show most clearly the impact of barriers. Participants (on average 46 years old) were grouped according to their experience level: novice (3 users) and experts (7 users). A profile of each user is described in Table 2.

## 2.3. Methodology

The user test was undertaken following the evaluation methodology proposed by Rubin [29] and Nielsen [30].

All user tests took place in the "casa de las personas sordas" (*deaf people's houses*) in an isolated room with a wifi connection, on a personal computer running Windows 7 Operating System (Service Pack 3) equipped with speakers, on a standard keyboard, and with a 2-button mouse with a scroll wheel.

After the user gave his consent, the session was recorded with the computer webcam. 50% of the users denied consent to record their face and 10% of them even denied consent to

<sup>3</sup> TwentyTenFive: <http://www.twentytenfive.com/>

<sup>4</sup> AccessibleFive: <http://accessible.sprungmarker.de/2011/04/accessible-five/>

<sup>5</sup> Accessible Audio Player (AAP). <http://www.terrellthompson.com/music/aap/>

<sup>6</sup> CCPlayer <http://www.ccplayer.com/>

<sup>7</sup> NA-site: <http://193.144.12.82/accesibilidad/wpA>

<sup>8</sup> Examiner: <http://examinator.ws/>

<sup>9</sup> Test de accesibilidad Web (TAW) <http://www.tawdis.net/>

<sup>10</sup> WAT de IExplorer: <http://www.paciellgroup.com>

<sup>11</sup> Firefox Web Developer: <http://chrispederick.com/work/web-developer/>

<sup>12</sup> Readability index calculator (Fernández-Huerta para español). <http://www.standards-schmandards.com/exhibits/rix/>

<sup>13</sup> World Wide Web Consortium.(2006). The W3C markup validation service. <http://validator.w3.org/>

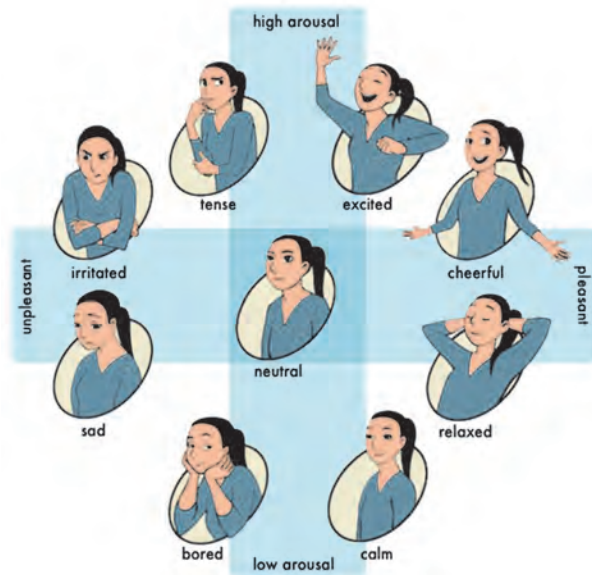


Figure 1. The Pic-A-Mood characters.  
Source: <http://studiolab.ide.tudelft.nl/studiolab/pmri/>

record the audio of the test because they did not feel comfortable with it. Morae 3.0<sup>14</sup> software was used to record users' interaction with both websites, and, if allowed, the same software was used to analyze facial expressions and users comments. When recording was not allowed, the observer made annotations that were subsequently analyzed.

Before the test, a questionnaire was administered to obtain a profile of the user. Participants were also asked to report on previous experiences interacting with either accessible or non-accessible websites. In the test, every user completed task 1 to task 5 on A-site and also on NA-site. Tasks were randomly ordered to avoid the effects of learning or fatigue. Tasks were written in plain language and were given to participants asking them if they had any doubts. For each task, measures were undertaken to ensure efficiency and effectiveness. After each task, the user was asked about his/her mood. To evaluate the mood in the pre-task and post-task test, we choose "Pic-a-Mood- PictorialMood-Reporting Instrument" [24] emocards (Fig. 1). In these kinds of evaluations the user chooses from among a set of characters -each one accurately and unambiguously representing a mood (in our case, tense, irritated, sad, bored, neutral, calm, relaxed, cheerful, excited)-one specific character that fits the users' current mood.

### 3. Results

#### 3.1. Pre-test questionnaire

Fig. 2 shows that all participants reported a negative mood when they visit websites with accessibility problems (Fig. 2a), and a more positive mood when they interact with websites that have no accessibility problems (Fig. 2b).

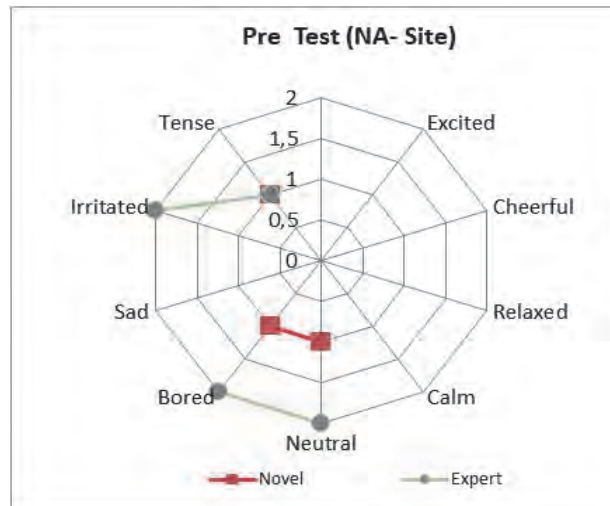


Figure 2a. Emotional evaluation in pre-test questionnaire (NA-website).  
Source: The author

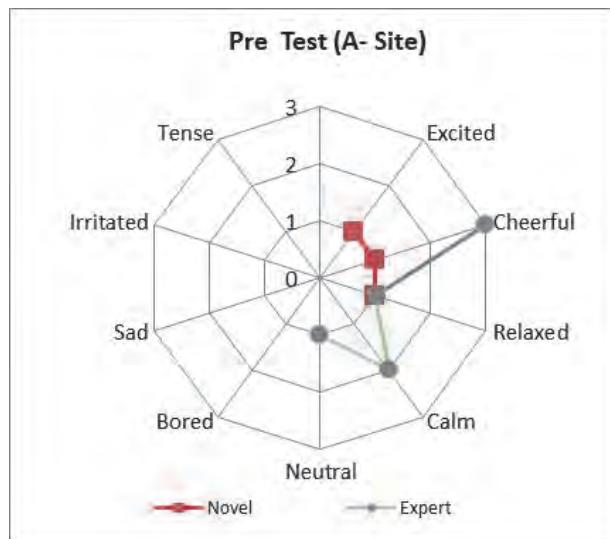


Figure 2b. Emotional evaluation in pre-test questionnaire (A-website).  
Source: The author

### 3.2. Barriers

The results are organized by barrier to distinguish their relative impact to users. For each barrier a table (see below) shows average task duration (in minutes), percentage of users who completed the associated task, and the emocard selected by users identifying their mood on the Non Accessible Web Site (NA) and on the Accessible Web Site (A).

#### 3.2.1. Barrier "No captions for audios"

This barrier was evaluated in task 1 (T1): Looking up a podcast. This task was impossible in NA-site as there was no script for the audio content. Users did not bother to press the

<sup>14</sup> Software Morae. <http://www.techsmith.com/morae.asp>

Table 3.  
Results of Task 1. Barrier “No captions for audios”

| Web site | Users group   |        | Time | Task completion rate | Emocard |
|----------|---------------|--------|------|----------------------|---------|
| NA       | 1.1.1.1.1.1.1 | Novice | 0.36 | 0%                   | Sad (3) |
|          | Expert        |        | 0.46 |                      |         |
| A        | 1.1.1.1.1.1.2 | Novice | 1.18 | 100%                 | Neutral |
|          | Expert        |        | 0.91 |                      |         |

Source: The author

play button, as they knew they would be unable to hear the audio.

Conversely, on A-site, 100% of users used the audio transcript to get the desired information, and although an audio record was offered, no user played it.

On this task, in the NA-site, three users choose the mood “sad”, and seven choose “neutral”, while in the A-site, all of them choose “neutral”. These results are detailed in Table 3.

After the task, one user stated “as I know that I will not be able to hear the audio, I don’t bother playing it”, and another said “I am very grateful to those web pages that took us into account and that offer a transcript in addition to the audio!”

### 3.2.2. Barrier “Video with no captions”

This barrier was evaluated in Task 4 (T4): “Playing a video”. This task, which was impossible to complete in NA-site was included to assess the mood in a common situation: the user browses a web site with an audio-visual content without a textual alternative. No user could finalize the task in the NA-site, because although the video showed a presenter in the foreground and users could read his lips, the camera occasionally pointed at the audience and it was impossible to understand the complete discourse. In this task all users described their mood as “irritated”.

Conversely, on the A-site 100% of the users could finalize the task as they were able to understand the video through the captions or the sign language (Fig.3). All users displayed a great joy (they choose the “excited” emocard) when they were able to completely understand the video. The results from this task are presented in Table 4. Some user comments were also annotated and can be used as qualitative feedback: “I get very nervous when captions are not synchronized with the image”, “very often I have no time to read the captions as they go too fast, and I also have problems understanding some words”, “even when there are captions, I’m very glad to see a sign-language interpreter because, then, I understand all the video. Otherwise I only get the outline”, “I prefer captions as there are different sign languages for Catalan and Spanish and sometimes I don’t understand the Catalan language very well”.

### 3.2.3. Barrier “Complex text”

This barrier was assessed in task 3 (T3): Looking up data in a data table, and in task 5 (T5): Looking up information in a monument.

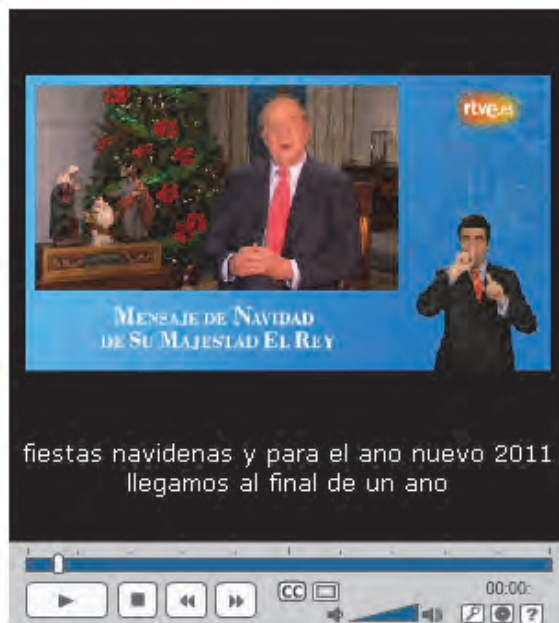


Figure 3. Video test from task 4 on A-site.

Source: rtve.es

Table 4.  
Results of Task 4. Barrier “Video with no captions”

| Web site | Users group   |        | Time | Task completion rate | Emocard   |
|----------|---------------|--------|------|----------------------|-----------|
| NA       | 1.1.1.1.1.1.3 | Novice | 0.72 | 0 %                  | Irritated |
|          | Expert        |        | 1.16 |                      |           |
| A        | Novice        |        | 0.97 | 100%                 | Excited   |
|          | Expert        |        | 1.10 |                      |           |

Source: The author

The data tables on both sites displayed similar information, but the wording was more difficult in the NA-site. For example, in the NA-site there was a column called “total precipitation”, while the same data was named “total rainfall” in the A-site. The rainfall was presented in quarters, which were indicated by words (January-March, April-June, etc.) in the A-site, but by anon-common abbreviations in the NA-site. The NA-site had also a color code indicating rainfall. In the T2 task, users had to indicate the month with higher rainfall, and they mostly failed in the NA-site despite the color code.

Task 5 evaluated complexity of contents. In the NA-site the text was complex, with difficult words and complex syntactic structures, with long sentences and a lot of subordinate clauses. Users were asked about some information indirectly given by the web content; a correct answer implied understanding of the wording. In the A-site, text was reviewed in plain-language [27] recommendations, with simple vocabulary, that used short sentences in an active voice and that had a reduced number of complements. The question in this site also required a deep understanding, but the answer was more direct.

Table 5.  
Results of Tasks 3 and 5. Barrier: Complex text

| Web site | Users group        | Time | Task completion rate | Emocard |
|----------|--------------------|------|----------------------|---------|
| NA       | 1.1.1.1.1.4 Novice | 2.19 | 0 %                  | Bored   |
|          | Expert             | 1.97 | 29%                  |         |
| A        | 1.1.1.1.1.5 Novice | 2.07 | 50%                  | Neutral |
|          | Expert             | 1.88 | 64%                  |         |

Source: The author

Task 3 and Task 5, which were associated with “Complex text”, has a more severe impact on participants: they need much more time than in other tasks, and the ratio of success was much lower than in task 1, 2 and 4, as any user could correctly complete these. The mood in the NA-site was “bored” and “neutral” in the A-site. Detailed results are shown in Table 5.

Some of the user comments were, “understanding text is what is most complex to me. I prefer images or videos transmitting the same information, as I understand them much better”, and “if the text is difficult and I am very interested in it, I read it three times and I look up the difficult words in a dictionary. But, if I am not very interested or I don’t have much time, I skim-read it and I get a general idea of its content”.

### 3.3. Post-test questionnaire

After completion of tasks, we asked users about their opinion of which site was more accessible. All of them, without hesitation, preferred the A-Website. Results from the post-task questionnaire are shown in Figs. 4a and 4b.

As shown in Fig. 4a, most users identified themselves with negative moods when using the NA site, except two who choose the “neutral” emocard. Contrastingly, moods chosen for the A-site were clearly more positive. Five users identified

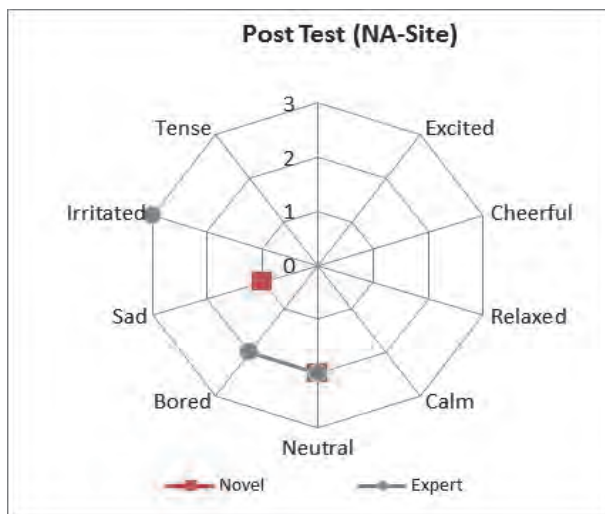


Figure 4a. Emotional evaluation in post-test questionnaire: comparing websites (NA-website).  
Source: The author

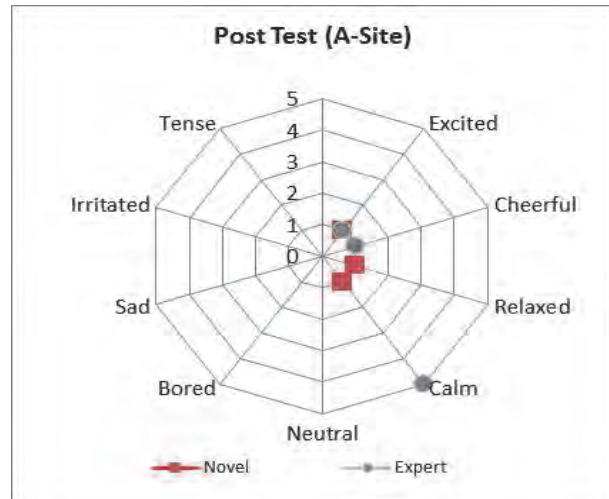


Figure 4b. Emotional evaluation in post-test questionnaire: comparing websites (A-website).  
Source: The author

themselves with the “calm” mood for this site that did not have accessibility barriers.

## 4. Discussion

Analyzing the initial user test data we observed some incoherencies between efficiency and effectiveness measures and users’ moods. We interviewed the users to be able to understand this mismatch and we discovered that they were not aware of their errors with complex text (T3 and T5). Therefore, we asked them again about their mood, informing them about their performance, and this time they chose a more negative mood. The results presented in the article are based on this second choice.

As we want to base the communication of accessibility errors for web 2.0 users on empathy, we chose to prioritize two barriers “Video with no captions” and “Complex text” as the most impacting ones for users with hearing loss. Regarding the need to include alternatives to audio-visual content, we are completely aligned with WCAG2. However, our prioritization does not fit exactly with WCAG2 on the importance of “complex text”, also assessed as very important to this group of users by other authors [31],[32], and –in our view– something that is incompletely covered by WCAG guidelines. Complex text has an AAA priority in WCAG2, and, as a consequence, many laws do not enforce it, as legislation usually sets AA priority as the maximum required level.

The evaluation of emotions is rather difficult, and there are many methodologies available. We are aware that using emocards is a subjective evaluation method and, as such, it is not fully reliable. However, we choose it as a simple measure, which is not completely different from other satisfaction tests.

## 5. Conclusions

The main contribution of this work has been to assess the impact of different accessibility barriers for users with hearing loss.

As the user tests were conducted with a low number of participants, the results are not statistically valid, but they give hints as to how barriers impact users with hearing impairments. Results from the test demonstrate several aspects that must be taken into account for future research:

- No participant paid attention to the audio element (podcast), as they did not expect any accessibility. Their mood was “neutral”
- Video content, on the other hand, was valued by participants, and they had expectations of captions and signing. In this case moods showed a high arousal.
- Participants were not very receptive to reading tasks, as they acknowledged their own difficulties. Both task 3 and task 5, which were related to the “complex text” barrier, showed a remarkable low level of completion.

In future work, we will tell Web 2.0 users to pay special attention when writing clear text and to include alternatives to video content.

## Acknowledgments

This work was financed by the Improved User Experience for Sustainable Open Government Data Infrastructures (InDAGuS-UX) (TIN2012-37826-C02-02) project, belonging to the Ministry of Economy and Competitiveness, and also by the collaboration agreement signed between ACTIVA MÚTUA 2008 and the University of Lleida. Funding has also been provided by the pre-doctoral grant from the University of Lleida awarded to Afra Pascual.

## References

- [1] Alfabetización mediática en el entorno digital. [Online]. Available at: [http://europa.eu/legislation\\_summaries/information\\_society/strategie\\_s/am0004\\_es.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/information_society/strategie_s/am0004_es.htm)
- [2] Informe mundial sobre la discapacidad: Deafness and hearing loss. Organización Mundial de la Salud. Febrero 2014. [Online]. [Date of reference: April of 2014]. Available at: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs300/en/>
- [3] García-Perales, F.J. y Herrero-Priego, J., Manual de atención al alumnado con necesidades específicas de apoyo educativo derivadas de discapacidad auditiva. Junta de Andalucía, Consejería de Educación, 2008. [Online]. ISBN 978-84-691-8127-0. [Date of reference: October of 2015]. Available at: <http://goo.gl/SYKuA6>
- [4] Bandeira, R., Lopes, R., and Carriço, L., Results from multidimensional accessibility assessment. In Proceedings of the 6<sup>th</sup> international conference on universal access in human computer interaction: design for all and eInclusion –Part I (UAHCI'11), Springer-Verlag, Orlando, USA, pp. 187-196, 2011.
- [5] Clark J., To hell with WCAG 2. A List Apart No. 217. 2006. [Online]. [Date of reference: April of 2014]. Available at: <http://alistapart.com/articles/tohellwithwcag2>
- [6] Caldwell, B., Cooper, M., Reid, L.G. and Vanderheiden, G., Web content accessibility guidelines 2.0, December 2008, [Online]. Available at: <http://www.w3.org/TR/WCAG20/>
- [7] Romen, D. and Svanæs, D., Validating WCAG versions 1.0 and 2.0 through usability testing with disabled users. Universal Access in the Information Society, 11 (4), pp. 375-385, 2012. DOI: 10.1007/s10209-011-0259-3
- [8] Bartlett, K., Analysis of WCAG and Section 508 by disability type, 2001. [Online]. The International Center for Disability Resources on the Internet. [date of reference: April of 2014] Available at: <http://www.icdri.org/Kynn/disability-comp.html>
- [9] Pascual, A., Ribera, M. y Granollers, T., Grado de afectación de las barreras de accesibilidad web en usuarios con discapacidad intelectual. In: S.B. and J.U. José Antonio Macías (Eds.), Interacción, pp. 23-26. 2013.
- [10] Pascual, A., Ribera, M., Granollers, T. and Coiduras, J.L., Impact of accessibility barriers on the mood of blind, low-vision and sighted users. Procedia Computer Science, 27, pp. 431-440, 2014. DOI: 10.1016/j.procs.2014.02.047. DOI: 10.1016/j.procs.2014.02.047
- [11] Brajnik, G., Web accessibility testing with barriers walkthrough. 2006. [Online]. [date of reference: June of 2013] Available at: [www.dimi.uniud.it/giorgio/projects/bw](http://www.dimi.uniud.it/giorgio/projects/bw)
- [12] Luckasson, R., Coulter, D.L., Polloway, E.A., Reiss, S., Schalock, R. L. Snell, M.E.; Spitalnik, D.M. y Stark, J.A., Mental retardation: Definition, classification and systems of supports. American Association on Mental Retardation. Washington, D.C. USA. 1992
- [13] Rubin, J., Handbook of usability testing: How to plan, design and conduct effective tests. John Wiley & Sons, NY. USA, 1994.
- [14] Schalock, R.L., Hacia una nueva concepción de la discapacidad. Siglo Cero, 30 (1), pp. 5-20, 1999.
- [15] Pascual, A., Ribera, M. and Granollers, T., Perception of accessibility errors to raise awareness among web 2.0 users. In Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Conference on Interacción Persona-Ordenador (INTERACCION '12). ACM, New York, NY, USA, 2012. DOI: 10.1145/2379636.2379652
- [16] Power, C., Freire, A., Petrie, H. and Swallow, D., Guidelines are only half of the story: Accessibility problems encountered by blind users on the web. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. ACM, pp. 433-442, 2012. DOI: 10.1145/2207676.2207736
- [17] Lang, P.J., Behavioral treatment and bio-behavioral assessment: Computer applications, 1980.
- [18] Cannon, W.B., The james-lange theory of emotions: A critical examination and an alternative theory. The American Journal of Psychology, pp. 567-586, 1987. DOI: 10.2307/1422695
- [19] Watson, D., Clark, L.A and Tellegen, A., Development and validation of brief measures of positive and negative affect: The panas scales. Journal of Personality and Social Psychology, 54 (6), pp. 1063-1063, 1988. DOI: 10.1037/0022-3514.54.6.1063
- [20] Russell, J.A., Weiss, A. and Mendelsohn, G.A., Affect grid: A singleitem scale of pleasure and arousal. Journal of Personality and Social Psychology, 57 (3), pp 493-493, 1989. DOI: 10.1037/0022-3514.57.3.493
- [21] Laurans, G., Desmet, P. and Hekkert, P., The emotion slider: A self-report device for the continuous measurement of emotion. In Affective Computing and Intelligent Interaction and Workshops, ACII 2009. IEEE, 3rd International Conference, pp. 1-6, 2009. DOI: 10.1109/acii.2009.5349539
- [22] Desmet, P., Overbeeke, K. and Tax, S., Designing products with added emotional value: Development and application of an approach for research through design. The Design Journal, 4 (1) pp. 32-47, 2001. DOI: 10.2752/146069201789378496
- [23] Desmet, P., Hekkert, P., and Jacobs, J.J., When a car makes you smile: Development and application of an instrument to measure product emotions. Advances in Consumer Research, 27, pp. 111-117, 2000.
- [24] Desmet, P., Vastenburg, M.H., Van Bel, D. and Romero, N.A., Pick-A Mood, Development and application of a pictorial mood-reporting instrument. In: Brassett, J., Hekkert, P., Ludden, G., Malpass, M. and McDonnell, J. (Eds.), Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Design and Emotion Conference, Central Saint Martin College of Art & Design, London (UK), 2012.
- [25] López, J.M., Pascual, A., Meduñña, C. and Granollers, T., Methodology for identifying and solving accessibility related issues in web content management system environments. In Proceedings of the International Cross-Disciplinary Conference on Web Accessibility (W4A '12). ACM, New York, USA, 8 P., 2012. DOI: 10.1145/2207016.2207043
- [26] Velleman, E. and Abou-Zahra, S., Website Accessibility Conformance Evaluation Methodology (WCAG-EM) 1.0 – 2013. [Online]. Available at: <http://www.w3.org/TR/WCAG-EM>
- [27] Cassany, D., La cuina de l'escriptura. Barcelona: Empúries, 218 P., 1993. ISBN: 84-7596-399-4
- [28] Pascual, A., Granollers, T., Ribera, M. and Coiduras, J., Methodology for designing user test environments to evaluate web accessibility

- barriers with disabled users. In the 7<sup>th</sup> International Conference on Advances in Computer-Human Interactions, ACHI 2014, pp. 103-108, 2014.
- [29] Rubin, J., Handbook of usability testing: How to plan, design and conduct effective tests. John Wiley & Sons, NY, USA, 2008
- [30] Nielsen, J. and Mack, R., Usability inspection methods. Published by John Wiley & Sons, New York, USA, 1994. ISBN 0-471-01877-5. DOI: 10.1145/259963.260531
- [31] Chung, J.W. Min, H.J. Kim, J. and Park, J.C., Enhancing readability of web documents by text augmentation for deaf people. In Proceedings of the 3rd International Conference on Web Intelligence, Mining and Semantics (WIMS '13). ACM, New York, USA, 10 P., 2013. DOI: 10.1145/2479787.2479808
- [32] Inui, K., Fujita, A., Takahashi, T., Iida, R. and Iwakura, T., Text simplification for reading assistance: a project note. In Proceedings of the second international workshop on Paraphrasing - Volume 16 (PARAPHRASE '03), Association for Computational Linguistics, Stroudsburg, PA, USA, pp. 9-16, 2003. DOI: 10.3115/1118984.1118986

**A. Pascual**, is BSc. degree in Computer Science in 2006, from the University of Lleida, Spain and MSc. in human-computer interaction in 2009, from the same university. She works in usability and accessibility of interactive systems, and her research interests are web accessibility and how to overcome digital accessibility barriers, knowledge field where she recently obtained her PhD. in Computer Science (UdL, 2015). Is currently undertaking her Ph.D.  
ORCID: 0000-0002-2368-755X

**M. Ribera**, is a BSc. degree in Computer Science from the Universitat Politècnica de Catalunya, Spain and PhD. in digital documentation from the Universitat de Barcelona, Spain. She is currently a professor in the Applied Mathematics Department (MAIA) at the University of Barcelona, Spain. She has worked in the field of digital accessibility for several years, teaching, researching and working on technology transfer. Her specialties are digital document formats. She has also coordinated the official translation of WCAG guidelines versions 1.0 and 2.0 from English to Catalan.  
ORCID: 0000-0003-1455-1869

**T. Granollers**, is a BSc. degree in Computer Science in 1988, from the Autonomous University of Barcelona Spain, and PhD. in Computer Science specializing in human-computer interaction in 2004, from the University of Lleida, Spain. After several years working in different companies as a computer programmer and Project Manager, he is now fully involved in teaching and research activities in the field of human-computer interaction (HCI). He is currently professor of computer science at the Industrial Engineering Department in the University of Lleida, and director of the Research Group on Human-Computer Interaction and Data Integration (GRIHO) at the same university. As a teacher, he is involved in the first Spanish-speaking HCI Master's and in interfaces design related subjects at other universities and private companies. He is a board member of the HCI Spanish association AIPO and of the ACM-SIGCHI Spanish chapter, CHISPA. At the GRIHO research group, he also leads and collaborates knowledge and technology transfer projects in industry. Finally, he is co-author of the book "Diseño de sistemas interactivos centrados en el usuario" published by UOC, 2004.  
ORCID: 0000-0001-9189-7308



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN  
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería  
de Sistemas e Informática

Oferta de Posgrados

Especialización en Sistemas  
Especialización en Mercados de Energía  
Maestría en Ingeniería - Ingeniería de Sistemas  
Doctorado en Ingeniería- Sistema e Informática

Mayor información:

E-mail: [acsei\\_med@unal.edu.co](mailto:acsei_med@unal.edu.co)  
Teléfono: (57-4) 425 5365

# Getting-up rehabilitation therapy supported by movement based interaction techniques

José Antonio Fernández-Valls <sup>a</sup>, Víctor M. R. Penichet, María Dolores Lozano & Juan E. Garrido <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Instituto de Investigación en Informática de Albacete (I3A), Universidad de Castilla-La Mancha, Albacete, España.  
[JoseAntonio.FernandezValls@gmail.com](mailto:JoseAntonio.FernandezValls@gmail.com)

<sup>b</sup> Universidad de Castilla-La Mancha, Real, España. {Victor.Penichet, Maria.Lozano, Juanenrique.Garrido}@uclm.es

Received: February 18<sup>th</sup>, 2015. Received in revised form: March 24<sup>th</sup>, 2015. Accepted: September 30<sup>th</sup>, 2015.

## Abstract

Every day the number of diseases related to brain problems increases dramatically. Medical facilities are full of people who need complex rehabilitation processes as a result of suffering from Parkinson's disease, Alzheimer's disease, brain stroke, or multiple sclerosis, as well as other conditions. Patients often spend a long time travelling every day to get to the corresponding rehabilitation clinics. Physiotherapists carefully attend patients over a period of time, and the exercises are often extremely repetitive. The type of patient suffering from these type of illnesses is unable to perform many common every day actions such as getting-up from a chair, walking in a straight line, picking up objects, etc. The system we propose in this paper provides a way for patients to perform the common rehabilitation process of getting-up from a chair. It monitors and guides the patient when the specialist considers they are prepared to do so. The specialists can focus on the results and the way to improve each rehabilitation process and not just on iterations.

**Keywords:** stroke rehabilitation; brain diseases; Kinect; movement interaction.

# Terapia de rehabilitación de levantarse guiada por medio de técnicas de interacción basada en movimiento

## Resumen

Cada día aumenta el número de casos encontrados de enfermedades que afectan al cerebro y que necesitan tratamiento en un centro de rehabilitación, tales como el Parkinson, el Alzheimer, los Ictus Cerebrales o la Esclerosis Múltiple. Algunas de ellas, suelen obligar al paciente a asistir a rehabilitación de forma ininterrumpida, lo cual exige desplazamientos diarios y la continua supervisión de un terapeuta. Muchos de estos pacientes necesitan reeducar alguno de los ejercicios básicos que se realizan en el día a día, como levantarse de una silla o caminar un tramo sin balancearse. Para ello, los terapeutas deben dedicar una cantidad de tiempo grande todos los días en comprobar que los pacientes realizan estos ejercicios de forma correcta. En este artículo, se presenta un sistema que monitoriza y guía en tiempo real al paciente en su proceso de rehabilitación para el ejercicio de levantarse de una silla.

**Palabras clave:** rehabilitación; interacción basada en movimiento; Kinect.

## 1. Introduction

Over time, the number of central nervous system diseases has been rapidly increasing. Most of them require a long period of rehabilitation to overcome or partially solve some of the problems they cause. The time devoted to this rehabilitation depends on each case, and it may even take the patient's whole lifetime: multiple sclerosis, and Parkinson's

disease are clear examples of this. Furthermore, the kinds of exercises that patients have to perform require professional supervision. It takes a long time and a lot of manpower to properly attend every patient. The vast majority of specialized medical centers have long waiting times. The implementation of measures to reduce patient waiting times would improve patient satisfaction and patient rehabilitation.

Specialists could increase the efficiency and accuracy of treatment.

Certain tasks took a long time to be performed in the past, but now they may be accomplished faster and automatically due to new technological advances. Technology is widely applied in the health field, although it is not particularly integrated into patient rehabilitation.

Due to the emergence of new interaction devices such as Microsoft Kinect, which allows user movement to be captured, systems have appeared which facilitate the rehabilitation process. These devices allow patients to interact with the application by simply using their body. They do not need to physically interact by manipulating any other hardware, which often proved to be too much trouble for them.

This paper presents a completely functional system for the rehabilitation of a patient performing one of the most common and frequent exercises: getting-up from a chair. The system makes use of movement-based interaction devices. It is focused on both the patient and the specialist. After a period of training together with the specialist, the patient may carry out part of the rehabilitation process at home. Unnecessary travel to healthcare facilities is avoided. The specialist may control the evolution of the patient via the application, and they do not need to be totally occupied on only one patient since the system monitors the patient for them. They are then free to accomplish many other tasks.

Thus, this proposal improves the quality of life for patients, and reduces waiting lists. These are both the main motivations for the implementation of the system we present in this paper.

The rest of the paper is organized as follows: Section 2 describes a number of related works and solutions that are found in this area. Section 3 provides a complete description of the system: The getting-up monitoring application that allows a patient to practice this frequent rehabilitation exercise. Section 4 presents the results obtained after the completion of two evaluations. Lastly, Section 5 provides some conclusions and future work.

## 2. Related work

The emergence of devices offering movement-based interaction in casual environments, such as video games, has created great interest with regard to their application in medical settings. Specifically, the rehabilitation processes, including physical exercise, is one of the main areas in which the research community has found a suitable environment in which to apply these techniques.

In the last few years we have been working on several functional movement-based interaction prototypes. Most of them were developed within the healthcare field: notably the automatic detection system for falls and fainting [2], and the balance disorder rehabilitation system [3]. The latter allows the patient to carry out the rehabilitation required that results from certain neurodegenerative disorders. Microsoft Kinect was used as the interaction device for these applications.

Regarding the systems that facilitate the rehabilitation process, a series of virtual games have recently appeared: the so-called serious games. Such applications attempt to motivate patients to carry out the rehabilitation process in a more effective, comfortable and friendly way [1,4,5].

In the following paragraphs, some of the current systems that use movement-based interaction devices for rehabilitation processes are described.

The first noteworthy related study is VirtualRehab [8], a new system for physical rehabilitation that uses the movement-based interaction provided by Kinect. The system allows the monitoring and tracking of patients from any location. The main objective of VirtualRehab is to offer patients an enjoyable way of completing complex rehabilitation processes at home. To this end, the equipment required comprises of a personal computer, Kinect for Windows and a screen. Additionally, VirtualRehab contains a management system that enables medical staff to plan, monitor and review each patient's progress. The system focuses on specific pathologies: acquired brain damage, neuromuscular diseases, and neurodegenerative diseases and reduced mobility in older adults. To treat these pathologies, VirtualRehab places patients in a virtual world in which they can work with nine games to perform specific movements in order to improve impairments (Fig. 1). These games make it possible to work with the affected parts of the body and physical symptoms, particularly regarding loss of motor ability, movement and posture disorder, and balance and coordination disorder.

SeeMe [7] is another major study on rehabilitation, but in this case, it corresponds to the assessment and treatment of unilateral spatial neglect. This project represents another system for rehabilitation that creates a virtual reality environment without the requirement for head-mounted displays or specialized equipment. SeeMe is a projected video capture of a virtual story in which the patient is embedded through their image. A representation of the patient is generated by capturing the patient performing the activities through a camera and by using specific algorithms for movement and position recognition and analysis. The participants should stand or sit in a specific area and view a monitor in which their virtual representation is shown during the exercises inside the virtual world. For example, patients can be embedded in a game in which they are touching virtual balls. Therefore, the participants can see themselves in a virtual story using trunk and limb movements. Additionally, the medical staff are able to change parameters of the virtual game (based on system indications and staff perceptions) during the rehabilitation procedure in order to adapt exercises and features according to patient progress and needs. In this way, SeeMe generates a set-up where patients and medical staff are together while the patient is working at the medical center.

Lastly, the Reflexion Rehabilitation Measure Tool (RMT) [9] is a Kinect-based system that allows the patient to perform rehabilitation exercises at home. The system gathers patient information, which is then sent to the specialists. It can then be analyzed and the therapy can be changed if

necessary. Interactive feedback is provided to the patient. In this way, they receive entertainment while they properly perform the exercises. An assistant character guides the patient in their performance, and gives them some clues as to how to proceed. A colored shadow represents the patient instead of their real image.

The main difference between the system we propose and those mentioned above is the user interface and some key points regarding the interaction. The proposal we present shows the real image of the patient, even if it is sometimes altered. Patients may watch their real body on the screen, and this provides feedback about what they are doing incorrectly. Thus, they can be made aware of what they are not getting right, so they can change any incorrect postures as they can see themselves. They are able to see exactly what is wrong. They can see exactly where something is wrong. Providing the real image of patients in the interaction may reduce the digital gap for people who are not used to these kinds of applications. Otherwise, the avatars may cause people to make mistakes and to not feel comfortable. Our proposal is not a serious game, but an application for rehabilitation. It is not designed in terms of how games are designed, although some techniques and elements may be found entertaining. It is a real rehabilitation exercise, and patients should carry it out in the same way they would do if a specialist were with them.

VirtualRehab proposes non-functional exercises, i.e. exercises that are not based on real ones. They are not typical rehabilitation exercises, but specific movements that patients should accomplish. Obviously, these movements are not random but are thought to be useful in the rehabilitation process. Current rehabilitation processes tackle daily and common situations, such as getting-up from a chair. This is exactly what we intend to focus on.

The SeeMe System provides another way to carry out virtual exercises, but always under the supervision of a specialist. Our proposal allows patients to perform exercises at home without the need to be continuously supervised by a specialist. The system monitors a patient's movements, and gives them feedback about how to properly proceed. Important information is recorded in every session, and sent to the specialist to study the patient's evolution. It does require some training. The specialist decides if and when a patient is prepared to perform exercises at home, which is something that is already done in many cases with some basic rehabilitations.

RMT does not provide any kind of customization, or even personalization according to patient needs and evolution. Patients are always different, even if they suffer from the "same" problem. They evolve in very different ways. Some suffer from amputated limbs, reduced mobility, partial disability, etc. The system we propose considers these restrictions, and may adjust some parameters individually in accordance with every patient's circumstances.

### 3. Getting-up learning exercise

People with brain damage have disorders that hinder their daily life. They can be limited when walking, picking up

objects, climbing stairs, etc. These common activities are natural and simple for people without brain handicaps, but those with a neurodegenerative disease or brain damage find them to be an important obstacle. Furthermore, as a consequence of certain diseases, patients must attend a rehabilitation center for long periods of time, in some cases their whole life. The rehabilitation process could be very burdensome for patients and their therapists, because patients have to perform a set of repetitive exercises and therapists may be required to conduct these exercises in order to correct them properly. This, together with the increase in diseases, which forces patients to attend rehabilitation processes, causes an increase in waiting times to obtain a place at one of these centers.

In this regard, the authors have developed a system, the main goal of which is to offer an aid to be used at rehabilitation centers or in the patients' homes in order to help patients in their specific disabilities.

Despite the large number of exercises that the cited patients can perform, the system developed focuses its efforts on one specific and concrete exercise. The exercise consists of guiding people with brain damage to improve or to learn how to get up from a chair. To that end, the system helps patients in the evolution of the exercise by continuously analyzing their postures and movements and guiding them. The patient receives indications to know how to preform and complete each of the steps. In this way, the system uses Kinect to analyze postures and movements, as is shown in Section 3.1. Via a screen, the user is shown the system interface, which contains appropriate indications, corrections and complementary information.

The system is an auxiliary tool that benefits all the main groups of people involved: the patients and their therapists. The patient can perform the exercises in their own home, thus avoiding a trip to the rehabilitation center. Regarding therapists, they find that the system offers them a tool that gives them more time and freedom to perform their work.

The next subsections describe the functionality and the foundations of the system, explaining how they work, how the patients interact with the system and how the system itself guides the patients via the interface.

#### 3.1. Foundations and deployment of the system

Movement interaction is the main technological foundation of the proposal. Related devices help position and movement detection through continuous interaction with users who are in their vision area. They offer the possibility of analyzing each situation and reacting appropriately. However, a more important fact is that movement interaction offers the possibility to control the system by means of the users' natural movements, such as hand gestures and body postures.

Kinect was the device used to work with movement interaction in order to avoid interfering in the rehabilitation process. This device makes it possible to monitor and correct a patient automatically, while performing the rehabilitation exercises. Kinect has been chosen due for two key reasons. Firstly, Kinect was readily available to the authors and its cost is

not too high in comparison with other devices, without sacrificing essential capabilities. And, secondly, this Microsoft device has already been used in several medical projects. Therefore, its integration in the field has been considerable; this allows us to know that it has a solid foundation.

The objective of the system is to allow the patient's posture and movements to be checked during the exercise without interruption. Posture and movement identification is performed with the use of the development kit that Microsoft provides. This process is a key element, so explaining how the system performs the identification is essential. The SKD allows for the recognition of all the body joints that Kinect is able to identify: 20 to be precise. These translate to points that are provided to the system through a class that represents the skeleton and offers the user access to them. Once the system obtains this class, the next step is to search for those points, by collecting their position in the obtained parameters that are necessary to identify correct postures. Each position is stored in a specific class that is made up of a set of three values that refer to the exact position of the point in space (x, y and z axes). Once the positions have obtained this representation, the detection of the patient's posture and movements starts while s/he is sitting on the chair.

The detection procedure is based on the consideration that there are pairs of body parts that may be aligned with a low error rate during some time periods. The following subsection describes the steps to be performed by the patient and which are the body points that have to be aligned in each step. For example, the points related to the shoulders have to be at the same height when the user starts the exercise and is sitting down; otherwise, the patient is badly positioned to start the exercise.

The deployment needed to achieve the objective of the system is composed of two main components. The first is that the server is responsible for holding information about the patients, the supervision of the exercises, the exercises themselves, and the relationships between these elements. This information is needed in order to adapt the interface and the conditions of each exercise in a personalized way. To that end, the Server offers this information through a set of Web Services. The second three components make up the deployment part, related to the place where the exercise is to be carried out: the Kinect device, a personal computer or laptop, and a screen. The deployment of the system is simple, and, if it is deployed in a patient's home, they can deploy it autonomously. The camera is connected to the personal computer or laptop on which the framework is executed. The Kinect device may be located in front of the chair that users will use during the exercise. At the beginning of the exercise, the system will display a line on the screen where the chair should be correctly positioned. And, finally, the screen is an essential element, showing the system interface. It is recommended to place the screen just above Kinect in order for the user to see their own image correctly. The interface guides the patients as an auxiliary tool by means of advice, corrections and information notes. The interface is described in depth in Section 3.4 due to its importance in the completion of the exercise.

### 3.2. Exercise description

This exercise is based on the interaction of a person moving from the sitting posture to the standing posture. To perform this exercise it is necessary to have a chair. The actual exercise in rehabilitation therapies is divided into several parts to be performed consecutively and in order:

- *Initial position:* The patient should be seated without being tilted to one side. The back should be straight, forming an angle of ninety degrees with the thighs. The legs should be separated to the width of the shoulders. The knees should form an angle of ninety degrees.
- *Step 1:* The patient should move their feet back, behind the knees. The space between the legs should be the same as in the initial position. The patient must keep the back straight, similar to the initial posture.
- *Step 2:* The patient must move their arms forward, keeping the previous position. At the end, the hands must be ahead of the knees and approximately at chest height, regardless of the separation between them.
- *Step 3:* The patient should tilt his back slightly forward (approximately forty five degrees), keeping to the restrictions of the previous two steps.
- *Step 4:* At this moment, they should start to rise until achieving the standing posture. It is important that the patient does not rock while rising. The therapist should also check that the patient does not put their hands down during this step, as it will be essential to correct their balance when standing up.
- *Final position:* The person should be standing with their back straight and their arms close to the body and feet to shoulder width.

After finishing a repetition, the patient should sit back and start the exercise again, until completing all the repetitions that their therapist has assigned them.

### 3.3. Overall functionality

Each step of the real exercise has been adapted to the program through states: a scan be seen in Table 1. Different states involve simple and essential actions that can be performed by people without any brain or degenerative damage. However, patients suffering from these types of disorder have difficulty in several situations, which makes their life more difficult. In this way, the system follows five simple steps to facilitate the instructions and to help patients to perform the activity.

Each state checks if the users can achieve the following state. In the case of every requirement being satisfied, the users progress to the next state. However, if they do not manage to satisfy the requirements, the system informs them about their mistakes and what they should do to correct them. The users can stay in the same state or they can return to a previous one, depending on the exercise restrictions. With regard to the movement and position analysis, which was described in section 3.1, the system knows the right indications which must be shown to the patient as well as telling them the right moment to do it.

Table 1.  
Exercises States

| State   | Steps           | Conditions to be met                                                                                                                      |
|---------|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| State 0 | Initial posture | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Back straight 90°</li> <li>• Feet shoulder width 90°</li> </ul>                                  |
| State 1 | Step 1          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Feet behind the knees</li> <li>• Separation feet shoulder width</li> </ul>                       |
|         | Step 2          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hands forward</li> <li>• Hands above waist</li> </ul>                                            |
|         | Step 3          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tilt back forward</li> </ul>                                                                     |
| State 2 | Step 4          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Stand up without rocking</li> </ul>                                                              |
| State 3 |                 |                                                                                                                                           |
| State 4 | Final Posture   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Arms close to body</li> <li>• Straight Back</li> <li>• Separation legs shoulder width</li> </ul> |

Source: Authors' own study

There are two different ways to carry out the exercise: restrictively and permissively. The first is focused on patients who are learning the exercise, so when they fail in one of the previous states, the system returns to this state automatically. The restrictive way, however, will be used by patients who have previously done the exercise several times, and therefore know the way the system operates. In this case, although some mistakes will have been made by the users in one of the previous steps, the system will advise them and allow them to go on with the task without having to go back.

Each time the steps are finished successfully, the system shows, through an instructions area, the following actions that must be performed in order to perform the next step. At the same time, in the animation area, there is a guide picture in which the same instruction is performed.

The program includes several sounds and voice orders in order to help the user to perform the exercise correctly. After checking the state, if the step has been completed, a congratulation sound will be emitted and an animation picture will appear at the bottom of the screen in the instructions area. Apart from the text pointing out the next action to perform, the users can choose to select the option of a voice that reads what is written in the instructions area. In the case of the users making a mistake, a sound will be emitted to make the users aware of it. The sound and voice system will be described in greater detail in Section 3.5.

### 3.4. User Interface

The system guides patients in their training and learning to get up from the chair by following each step (previously described) through an intuitive interface. The analysis carried out by the system, using the Kinect device, defines the interface behavior. The system continuously checks the posture and movement of the patient, as described in Section 3.1. The results obtained allow the system to know if the patient has performed any incorrect movement in order to create adequate interface indications to help with the completion of the exercise.

The system's indications represent the main assistant element for patients and physiotherapists. The assistant helps during the execution of the exercise in a way that avoids the

need for physiotherapists to physically be at the location where patients perform the therapy. In this way, the interface represents an essential component to be able to create a rehabilitation environment in which patients are corrected in the most natural possible way.

Three main areas make up the system interface: shown by Fig. 1. The broad area can be divided into the following components:

- Area with textual information (Fig. 1-1).
- Animation area (Fig. 1-2).
- Signal of Kinect (Fig. 1-3).

The first area indicates the action to be performed by the patient. To that end, the textual area shows the instructions to follow and uses a clear and large font. This component will be essential to guide users during the exercise, as it will show the next step if the current one has been accomplished, or a correction to be made to achieve successful completion.

The second area shows an animation in the form of a guide puppet that helps the instructions area to complete the feedback patients need to perform the exercise. The animation shown corresponds to the next action the patient has to perform, which is simultaneously indicated in the textual instructions area.

The main area covers the rest of the interface with the video signal offered by Kinect. The signal contains the patient working on the therapy with additional visual content. This information is essential because it indicates how the patients are performing the exercise, and then it allows them to check errors and to solve them. The main area can be divided into different parts, according to the information offered. Firstly, this area contains some animations, used to give indications for correction, and also to congratulate when the steps, or the whole exercise, are completed.

The correction animation is designed to indicate which body parts are badly positioned through a semi-transparent red area located in the related joints. As a result, the patients will be able to know where they are failing. Figs. 1-6 show an example in which a patient has positioned their feet incorrectly. In addition, the figures shows another correction using scales located in the upper area. This element represents the position of the patient's back, in respect to the X axis. The scales lean to the left/right if the patient twists



Figure 1. User interface of the system  
Source: Authors' own study



Figure 2. User interface when the whole exercise is performed.  
Source: Author's own study

their back to the left/right, and change color indicating the need for the user to correct their posture. Otherwise, if the patient makes a short twist movement, the scales slightly change position (not color): enough to indicate the unbalanced movement of the patient. This element is essential due to the importance of positioning the back in a straight way during each stage of the exercise. Red indications appear when an error is found, following the standard procedure of associating red with errors. Continuing with the same area, a congratulations message appears when a step is performed correctly. The correct area is completed with two sets of circles.

The first one is located on the left side and represents the number of attempts made through ellipses that change color with an animation when the user makes progress. The other one is located in the bottom area of the interface and indicates the progress of the whole exercise. This area is responsible for notifying the user in which step of the exercise they are. Just like the attempts, with a set of animated ellipses, the system shows the patient's progress. In this case, each ellipse contains an internal image that represents the related step.

Finally, the system shows a box with errors committed by the patient when an attempt is completed and highlights those that appear more than once (Figs. 2-7).

### 3.5. Sound system

The system contains a set of functions to offer users feedback using voices and sounds. To that end, the user should enable the related option located that is located in the configuration window (Section 3.6).

The patients who make use of the system are people from a wide age group, from children through to older people. The percentage of people with visual problems increases with age: 30% for people between 15 and 44, increasing to 100% for people older than 45. Therefore, the system needs to take into account that many users will have visual problems. The use of sound and issuing voice instructions becomes, therefore, an essential element.

The system generates a light error sound each time an incorrect posture is detected, in order to notify patients of

what has occurred. In addition, the patient can enable the option to be notified by voice messages by using the configuration windows. The source of each error is analyzed with the aim of avoiding constant error repetitions. If the source is the same as for the last one, the system will not emit the error sound until the patient makes an error with a different source.

At the same time, the patient hears sounds when they complete an attempt or the whole exercise. This information provides the user with positive feedback so that they know when a step is correctly performed, without the need to focus on the visual animations.

The voice system helps patients by dictating the phrase that appears in the instructions area. The system checks the phrase to know if it is different to the previous one, in order to avoid constant repetitions, as occurs with the error sounds. In this case, the system considers a margin of 5 seconds before repeating the instructions, if the current and the last one are identical. In this way, the system avoids constant repetition of the same instruction. If the user performs the current instruction during its dictation, the sound is cancelled and the system starts the dictation of the next one. The sound system, with the visual reinforcement of the instructions area and the animations area, guides the user during the completion of the exercise and overcomes the possible doubts that the patients may have, relating to either incorrect movements or to the next step to be completed.

### 3.6. Exercise settings

Thanks to the system, patients and physiotherapists have the possibility to modify some options to configure exercises in a personalized way. The system offers three different ways to configure an exercise.

The first option is the possibility to turn on the sound during exercise, as has been mentioned in the previous section. This option will be available to patients and physiotherapists.

The next option allows setting the correction mode that the exercise will follow: permissive or restrictive mode. A description of each of these methods is provided to facilitate the choice. This option will only be available to the therapist.

And, finally, the system allows changing the difficulty of the exercise and enabling or disabling joints in the body. The system has been created to be useful for any patient. For example, if a patient has an immobilized arm, the system will always detect errors because of the checks. In this way, the system is able to work with threshold values of difficulty at any check step by modifying the body parts involved.

## 4. Evaluation

In this section we present the tests performed by a set of users throughout the different stages of the system's development.

The first tests were performed with five users without previous experience of the project, and they were focused on finding problems related to usability and functionality.

The second tests were performed by two experts in rehabilitation, and were based on finding out the level of usefulness of the application and fixing the errors found in the design of the different exercises. Below, we show the results obtained from these tests and the changes to be undertaken. Finally, we summarize the conclusions reached after the performance of the tests, highlighting the most important points extracted from both evaluations.

#### 4.1. First evaluation

The set of the tests were performed on five users with different ages, two teenagers with a high level of knowledge in new technologies, an adult person with a medium level of knowledge in new technologies and two older people with inadequate or no knowledge of technology. None of them had previous experience in using the system.

The number of users selected to perform the test (five) is enough to discover 85% of the problems and pitfalls, according to the usability expert, Jakob Nielsen [6].

The tests were performed in a 7x4 meter room with a 24" screen as visualization device. A Kinect device was placed just below the screen, at a height of one meter above the ground.

In order to check whether the interface elements and the program functionality were intuitive enough, the users were not informed previously about how they should perform the rehabilitation exercises. They were just informed about the purpose of the exercise, and we analyzed the time they required to finish the exercise as well as the problems they had in performing the exercise.

If a user got stuck while performing the exercise, they were given some instructions to help them proceed. When they finished the first repetition of the exercise, they were required to identify each one of the user interface elements and the functionality they thought these elements had.

After gathering this information, both the functioning of the system and the user interface elements were explained to them. Once they knew how to perform the exercise, they were required to repeat it four more times, and they were given help if they had any difficulty.

Some changes were made to the system based on the feedback gathered from this evaluation. The most important ones were the following:

- Modification of the color of the scales, so that just the wrong half of was highlighted in red instead of highlighting the whole.
- Most of the commands included in the instruction box were rewritten to make them easier to understand.
- A voice and audio system was implemented to support the performance of the exercise, in order to help patients that can hardly read the commands displayed on the screen.
- The dummy guiding the exercise was modified to make it bigger and more intuitive.
- The color tone of the bones corrector was modified to make it semi-transparent so as not to interfere with the exercise.

- The content of the steps panel was modified to give better feedback to the user regarding the current step they are performing.

#### 4.2. Second evaluation

This set of tests was performed with two experts in rehabilitation therapies who were collaborating with the project: a physiotherapist and an occupational therapist. The purpose of these tests was to check the actual usefulness of the system, as both therapists know well the behavior patterns and limitations of rehabilitation patients. In this way, they could reproduce the performance of the exercises to check that the system really meets all the requirements.

These tests were focused on checking the correct functioning of the system and gave less importance to the user interface. Both therapists performed the exercises imitating the behavior of a real patient. They also checked that every step performed in the exercise matched the previously programmed one, and that the system worked properly in terms of identifying the different steps.

While performing the evaluation, the therapists realized that the exercise did not adapt to the possibility of a patient having a disability or impairment in any of their limbs. If they simulated an idle arm, the exercise failed in the first verifications and it was impossible to finish the exercise, leaving the user stuck in one of the steps.

To solve the problem of users with disabilities or impairments, we modified the design of the system in such a way that the therapists could choose which parts of the body the system should focus on in every step and the degree of freedom of each part should have.

Another aspect of the system that was changed was giving the patient the possibility of avoiding showing their body on the screen, and, instead, substituting it with an abstract human figure.

The experts also proposed showing more information on the screen related to the failures committed by the users during the execution of the exercise. The problem with this was mainly cluttering the screen with too much information that could distract the user from the exercise. Instead, we proposed the implementation of a software module to store the patient's statistics and failures during the exercise.

#### 4.3. Evaluation conclusions

The first evaluation allowed us to improve the system in terms of simplicity and clarity of the user interface, making it more intuitive and easy to use. In addition, we were able to detect and fix the different kinds of problems found in every age range.

In general, the users of the first assessment concluded that the system was easy to use and comfortable. Thanks to the feedback comments received to improve the system we were able to fix most of the problems found during the assessment.

Regarding the heuristic evaluation and according to the therapists' opinions, they concluded that the system would have a high level of acceptance within the sector, as it would

be really useful for the majority of patients following rehabilitation therapy. It was claimed that 90% of patients could use it without any problem.

The experts' general conclusions were that the system could be a very useful element in performing their work as it allows patients to perform the exercises in a correct way and with the information needed in case they are primarily not able to do them properly. More time could, therefore, be dedicated to other patients.

## 5. Conclusions and future work

In this paper, we have presented a system to support the rehabilitation therapies of patients with neurodegenerative problems and brain disorders when they need to perform common exercises, such as sitting down or getting up. We have developed a system to support one of the most commonly used exercises for the rehabilitation of disorders affecting the nervous system. This exercise has been designed exactly as it is performed in real life, including additional elements to allow the patient to perform the exercise individually without the therapist.

Apart from the exercises implemented in the system, we have also developed a system that allows the personalization of the exercises, so as they can be adapted to all types of patients.

With this system, and after a minimal training set by the experts, patients can perform the exercises by themselves. In this way, the system offers several benefits from both the point of view of the physiotherapists and the patients. Physiotherapists thus have a useful tool through which they can help patients without the need to be constantly present during the execution of the exercise.

Thus, physiotherapists may have more time to perform their tasks in a more efficient way. Additionally, patients can perform the exercises at the health center or even at home, which makes the rehabilitation process easier to follow by avoiding problems regarding time and distance; the patients can perform the exercises at any time and without the need for daily trips to the rehabilitation center.

The system acts as a personal assistant that guides patients during the rehabilitation process. In particular, the whole process is composed of a set of five states that are divided into three stages. The first stage is being seated on a chair and has two conditions: keeping the legs at a right angle and maintaining a straight back. The second stage consists in lifting the body, moving the back forwards and stretching the arms out. Finally, the patient should be able to get up autonomously.

They system offers enough indications to help patients complete the exercises correctly. The system continuously analyzes the postures and movements of the user. The system's indications and feedback depend on the result of this analysis. In this sense, the user interface becomes a key element in the system, as all its components have to be as clear and intuitive as possible in order to act as a guide for the exercise.

The interface includes textual indications, the current video signal, examples of how to perform each step in the exercise, and finally, images about corrections of postures and movements. Additionally, the interface offers animations to congratulate the correct performance of the exercise to encourage the patient.

Kinect is the device that allows movement-based interaction with the system. This device allows patients to interact with the system in a natural and intuitive way through postures and movements. In this paper we have shown how Kinect can be applied in health centers to solve a specific problem.

The system proposed presents a very promising future application. Firstly, we are working on the improvement of the user interface to make the interaction between the patient and the system as natural as possible.

Regarding the conclusions reached with the system evaluation (see section 4.3), we plan to create a new visualization mode that allows the user to choose an avatar to represent them in a virtual setting. In this way, we will solve the problem that some patients have when they see themselves on the screen, feeling uncomfortable with this situation.

Furthermore, we have the possibility of creating a system to store the statistics and failures committed by the patients while executing the exercise. In this way, the physiotherapist can control the patients' rehabilitation evolution more efficiently.

Finally, we are considering more exercises to include in the system. The system described in this paper is composed of a unique but complete exercise used as a treatment for specific brain disorders. The goal is to offer different solutions for different health problems by supporting the execution of a broad set of rehabilitation exercises.

## Acknowledgements

This work has been partially funded by project TSI-100101-2013-147, belonging to the Spanish Ministry of Industry, Energy and Tourism. We also want to thank Carlos Gimena Bello for his work on this application.

## References

- [1] Fikar, P., Schoenauer, C., and Kaufmann, H., The Sorcerer's apprentice: A serious game aiding rehabilitation in the context of subacromial impingement syndrome. In Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare (PervasiveHealth '13). ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), Brussels, Belgium, Belgium, pp. 327-330, 2013. DOI: 10.4108/icst.pervasivehealth.2013.252224
- [2] Garrido, J.E., Marset, I., Penichet, V.M., Lozano, M.D. and Fernández, J.A., Automatic detection of falls and fainting. Journal of Universal Computer Science, 19 (8), pp. 1105-1112, 2013. DOI: 10.3217/jucs-019-07
- [3] Garrido, J.E., Marset, I., Penichet, V.M. and Lozano, M.D., Balance disorder rehabilitation through movement interaction. In: Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare (PervasiveHealth '13). ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications

- Engineering), Brussels, Belgium, Belgium, pp. 319-322, 2013. DOI: 10.4108/icst.pervasivehealth.2013.252368
- [4] Lange, B., Koenig, S., McConnell, E., Chien-Yen, Ch., Juang, R., Suma, E., Bolas, M. and Rizzo, A., Interactive game-based rehabilitation using the Microsoft Kinect. In Proceedings of the 2012 IEEE Virtual Reality (VR '12). IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, pp. 171-172, 2012. DOI: 10.1109/VR.2012.6180935
- [5] Lozano-Quilis, J.A., Gil-Gómez, H., Gil-Gómez, J.A., Albiol-Pérez, S., Palacios, G., Fardoum, H.M. and Mashat, A.S., Virtual reality system for multiple sclerosis rehabilitation using KINECT. In Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare (PervasiveHealth '13). ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), Brussels, Belgium, Belgium, pp. 366-369, 2013. DOI: 10.4108/icst.pervasivehealth.2013.252208
- [6] Nielsen, J., Why you only need to test with 5 users. [Online]. Available at: <http://www.nngroup.com/articles/why-you-only-need-to-test-with-5-users/>
- [7] Sugarman, H., Weisel-Eichler, A., Burstin, A. and Brown, R., Use of novel virtual reality system for the assessment and treatment of unilateral spatial neglect: A feasibility study. Proceedings of the 2011 International Conference on Virtual Rehabilitation; Zurich, Switzerland. New York: IEEE; 2011. DOI: 10.1109/ICVR.2011.5971859
- [8] Virtualware Group., 2013. [Online]. Virtual Rehab. Available at: <http://virtualrehab.info/product/> [Accessed: 04-10th-2014]
- [9] Westhealth Institute., Reflexion rehabilitation measure tool. [Online]. [Date of reference: April 06<sup>th</sup> of 2014]. Available at: <http://www.westhealth.org/institute/our-priorities/reflexion>

**J.A. Fernández-Valls**, received his MSc. in computer science from the University of Castilla-La Mancha, Spain. He has been a PhD. student at the University of Castilla-La Mancha in Albacete since 2013. He belongs to the Interactive Systems Everywhere (ISE) research group ([www.iserresearch.com](http://www.iserresearch.com)) at the University of Castilla-La Mancha. His research interests include: Human-Computer Interaction (HCI), movement-based interaction, and interactive systems development. ORCID: 0000-0003-2466-3653

**V.M.R. Penichet**, has been an associate professor at the Department of Computer Systems at the University of Castilla-La Mancha, Spain since 2007. He belongs to the Interactive Systems Everywhere (ISE) research group ([www.iserresearch.com](http://www.iserresearch.com)) at the University of Castilla-La Mancha. His current research is based on Human-Computer Interaction (HCI) and Distributed User Interfaces (DUI). He is author of nearly 100 publications in journals and international conferences. He is involved in various research projects. He has previously organized several workshops and conferences with substantive output (Springer books and JCR Journals): DUI 2011-2014, Interacción 2008, CADUI 2008, REHAB 2013, 2014. ORCID: 0000-0003-1125-9344

**M.D. Lozano**, has been an associate professor at the Department of Computing Systems at the University of Castilla-La Mancha in Albacete, Spain, since 2003. She received her MSc. and a PhD. in computer science from the Technical University of Valencia, Spain. She co-directs the Interactive Systems Everywhere Research Group (ISE Research) of the Albacete Research Institute of Informatics. Her teaching and research areas cover software engineering and human computer interaction. She is author of more than 80 papers in journals, book chapters and international conferences. She is guest editor of some special issues in journals indexed in the Journal Citation Report. She has co-chaired some technical conference programs in the field of human-computer interaction, and she is a member of several Program Committees of different national and international conferences. Her research interests include interactive systems development, Model-Based User Interfaces, tangible interfaces, usability and collaborative environments. ORCID: 0000-0003-4069-2112

**J.E. Garrido**, was born in Albacete, Spain on April 24<sup>th</sup>, 1984. He received his PhD. in Computer Science at the University of Castilla-La Mancha, Albacete, Spain in 2014. His research interests include ubiquitous computing, context-awareness, collaborative environments and HCI. In particular, he is involved in the improvement of healthcare environments with current technology based on the above-cited topics. He worked as a research assistant at ReTICS (Real-Time and Concurrent Systems) from 2008 to 2009, when he started with the ISE Research group as a PhD student. ORCID: 0000-0003-4854-0914



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN  
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería  
de Sistemas e Informática

Oferta de Posgrados

Especialización en Sistemas  
Especialización en Mercados de Energía  
Maestría en Ingeniería - Ingeniería de Sistemas  
Doctorado en Ingeniería- Sistema e Informática

Mayor información:

E-mail: [acsei\\_med@unal.edu.co](mailto:acsei_med@unal.edu.co)  
Teléfono: (57-4) 425 5365

# Entregando lo mejor de los **colombianos**



Línea de atención al Cliente Nacional: **01 8000 111 210**

Línea de atención al Cliente Bogotá: **(57-1) 472 2000**

► **[www.4-72.com.co](http://www.4-72.com.co)**

## DYNA

82 (193), October, 2015

is an edition consisting of 250 printed issues  
which was finished printing in the month of October of 2015  
in Todograficas Ltda. Medellín - Colombia

The cover was printed on Propalcote C1S 250 g,  
the interior pages on Hanno Mate 90 g.  
The fonts used are Times New Roman, Imprint MT Shadow

- A study of the ground plane effect in passband filters using OSRR cells
- Methodological design for the prevention of risk in production processes
- Learning manager for remote experimentation with optoelectronic devices
- A comparative study of two aging and fusion methods in the synthesis of zeolitic materials from natural clinker
- Implementation of computing with words in evaluating training program
- Wave energy resource assessment at southern coast of the Gulf of Mexico
- Impact of previous acclimatization of biomass and alternative substrates in sunflower oil biodegradation
- Analysis of the partial discharge pulse propagation in the stator winding of a synchronous machine
- An improvement to the classification based on the measurement of the similarity quality using fuzzy relations
- Thermal and energy evaluation of a novel polymer-ceramic composite as insulation for a household refrigerator
- Shear strength of landfills
- Energy efficiency in the zeolite impact crushing plant of San Andrés (Holguín, Cuba)
- A methodology to obtain an analytical formula for the elastic modulus of lightweight aggregate concrete
- Wear resistance of vanadium-niobium carbide layers grown via TRD
- Behavior of coated forming tools with TiAlN coatings grown by Triode Magnetron Sputtering
- Solution architecture approach, mechanism to reduce the gap between enterprise architecture and implementation of technological solutions
- Development of a digital TV receivers test suite
- Channel connections resistance at elevated temperatures
- Integration model of collaborative supply chain
- Effects of uncertainty on scheduling of highway construction projects
- Mining unstructured data to support requirements elicitation by using controlled vocabularies: A systematic mapping study
- Development of a concept-based EMG-based speller
- HMI/ SCADA standards in the design of data center interfaces: A network operations center case study
- Agile human centered methodologies to develop educational software
- Prediction of take-over time in highly automated driving by two psychometric tests
- Comparing the efficiency of performing complex tasks with a tablet and a smartphone
- Assessing the awareness mechanisms of a collaborative programming support system
- A design process for balanced educational video games with collaborative activities
- Impact of web accessibility barriers on users with a hearing impairment
- Getting-up rehabilitation therapy supported by movement based interaction techniques
- Estudio del efecto del plano de masa en filtros pasa banda usando celdas OSRR
- Diseño metodológico para la prevención de riesgos en procesos de producción
- Gestor de aprendizaje para la experimentación remota con dispositivos optoelectrónicos
- Estudio comparativo de dos métodos de envejecimiento y fusión en la síntesis de materiales zeolíticos a partir de clinker natural
- Aplicación de la computación con palabras en la evaluación del impacto de la capacitación
- Evaluación del potencial energético del oleaje en la costa sur del Golfo de México
- Incidencia de la aclimatación previa de la biomasa y sustrato alternativo en la biodegradación de aceite girasol
- Análisis de la propagación de pulsos de descarga parcial en el devanado del estator de una máquina sincrónica
- Una mejora a la clasificación basada en la medida calidad de la similaridad utilizando relaciones borrosas
- Evaluación térmica y energética de un nuevo composite polímero-cerámico como aislante en un refrigerador doméstico
- Resistencia al esfuerzo cortante en rellenos sanitarios
- Eficiencia energética en la trituración por impactos en la planta de zeolitas de San Andrés (Holguín, Cuba)
- Una metodología para obtener una fórmula analítica para el módulo de elasticidad del hormigón de áridos ligeros
- Resistencia al desgaste de capas de carburo de vanadio-niobio crecidas por medio de TRD
- Comportamiento de las herramientas de conformado con recubrimientos TiAlN crecido por Magnetron Sputtering Triodo
- Enfoque de arquitectura de solución, mecanismo para reducir la brecha entre la arquitectura empresarial y la implementación de soluciones tecnológicas
- Desarrollo de una suite de pruebas para receptores de TV digital
- Resistencia de las conexiones tipo canal a elevadas temperaturas
- Modelo de integración de cadenas de suministro colaborativas
- Efectos de la incertidumbre en la programación de proyectos de construcción de carreteras
- Minería de datos sin estructura para el soporte de la adquisición de requerimientos mediante el uso de vocabularios controlados: Un estudio de mapeo sistemático
- Desarrollo de un deletreador basado en conceptos basados en EMG
- Estándares HMI/SCADA para el diseño de interfaces en los centros de datos: El centro de control y operaciones como caso de estudio
- Metodologías ágiles centradas en personas para desarrollar software educativo
- Predicción de control sobre el tiempo en conducción altamente automatizada en dos tests psicométricos
- Comparando la eficiencia al realizar tareas complejas con una tableta frente a un smartphone
- Evaluando los mecanismos de awareness de un sistema de soporte a la programación colaborativa
- Proceso de diseño para videojuegos educativos con actividades colaborativas
- Impacto de las barreras de accesibilidad web en usuarios con discapacidad auditiva
- Terapia de rehabilitación de levantarse guiada por medio de técnicas de interacción basada en movimiento