



Revista Energética



un

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MANIZALES

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ISSN 0120-9833 (impreso) ISSN 2357 - 612X (en línea)

44

Diciembre de 2014



Publicación de la
Universidad Nacional de Colombia
Sede Manizales

Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Universidad Nacional de Colombia
Sede Manizales

energetica_nal@unal.edu.co
<http://www.revistas.unal.edu.co/energetica>

Licencia 02126, junio 21 de 1988 las opiniones aquí
expresadas, son responsabilidad de sus autores.

ISSN 0120-9833 (impreso)
ISSN 2357 - 612X (en línea)



Publicación semestral editada por el Departamento
de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación
de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la
Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales;
fundada en 1987 con el fin de promover el avance y
la difusión de nuevo conocimiento relacionado con
la energía y sus tópicos. Energética está orientada
a la publicación de artículos originales basados en
resultados de investigación y ensayos relacionados
con: aplicaciones industriales, política energética,
energía y economía, energía y sociedad, energía y
ambiente.

Asistente Editorial
Nataly Arenas Vargas

Diseño y Diagramación
Paula Bibiana Mejía Pinzón

Fotografía
Camilo Younes V.
Itaipu

Impresión
Editorial Blanecolor
Manizales - Caldas
Diciembre de 2014



Director

Camilo Younes Velosa
Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales

Comité Editorial

Dra. Beatriz Helena Aristizábal Zuluaga,
Dr. Juan Bernardo Gómez Mendoza,
Dra. Belizza Janet Ruiz Mendoza,
Mg. Carolina Salazar Marulanda,
Dr. Eduardo Antonio Cano Plata,
Dr. Jorge Julián Vélez Upegui
Mg. Santiago Ruiz Herrera
Universidad Nacional de Colombia
Sede Manizales.

Comité Científico

Sonia Rosa Briceño Viloria,
Universidad Nacional Autónoma de México.

Rafael Almanza,
Universidad Nacional Autónoma de México.

Víctor Rodríguez Padilla,
Universidad Nacional Autónoma de México.

Erik Alexánder Blanco Guillén,
Universidad Don Bosco, El Salvador.

Esperanza de la Caridad Ayllón Fandiño,
Instituto Superior Politécnico JAE, Cuba.

Conrado Moreno Figueredo,
Instituto Superior Politécnico JAE, Cuba.

Dr. Guillermo Ribeaux Kindelán,
Universidad de Oriente, Cuba.

Cristian Campos Fernández,
Universidad de Costa Rica.

Juan Matos,
Instituto Venezolano de Investigaciones
Científicas, Venezuela.

Manuel Peláez,
Universidad de Cuenca, Ecuador.

Estela de la Gracia Assueira Espinoza,
Pontificia Universidad Católica del Perú.

Isabel Melina Balderrama Durán,
Universidad Católica Boliviana "San Pablo",
Bolivia.

Carlos Castro,
Universidad Estadual de Campinas, Brasil.

Luiz Carlos Pereira Da Silva,
Universidad Estadual de Campinas, Brasil.

Julieta Puerto Rico,
Universidad de São Paulo, Brasil

Julio Del Valle Jeldres,
Universidad de Santiago de Chile.

Enrique San Juan,
Universidad Santiago de Chile.

Humberto Verdejo Fredes,
Universidad de Santiago de Chile.

Ingeborg Mahla,
Universidad Santiago de Chile.

Sebastián Ríos Marcuello,
Pontificia Universidad Católica de Chile.

Waldy Aníbal Riveros Saavedra,
Universidad Nacional de Itapúa, Paraguay

Osvaldo Año,
Universidad Nacional de San Juan, Argentina.

Nicolás Di Sbroiavacca,
Fundación Bariloche, Argentina.

Hilda Dubrovsky,
Fundación Bariloche, Argentina.

Mauricio Eduardo Samper,
Universidad Nacional de San Juan, Argentina.

José Cataldo,
Universidad de la República de Uruguay.

Alberto Arce,
Wageningen University, Holanda.

Claudio A. Cañizares,
University of Waterloo, Canadá

José Luis García Moscoso,
Old Dominion University, Estados Unidos.

Tania Isabel Jiménez,
Universidad Tecnológica de Bolívar Colombia

Gustavo López Álvarez,
Universidad EAFIT, Colombia.

Jhon Jairo Pérez Gelves,
Universidad de la Salle Colombia.

Pedro Jaime Pineda Parra,
Universidad de la Salle Colombia.

Luz Dinora Vera Acevedo,
Universidad Nacional de Colombia Sede
Medellín.

Oscar Gonzalo Manrique Díaz,
Universidad Nacional de Colombia Sede
Medellín.

Giovanni Franco Sepúlveda,
Universidad Nacional de Colombia Sede
Medellín.

Farid Chejne Janna,
Universidad Nacional de Colombia Sede
Medellin.

Gustavo Agredo Cardona,
Universidad Nacional de Colombia Sede
Manizales.

Dr. Eduardo Antonio Cano Plata,
Universidad Nacional de Colombia Sede
Manizales.

Sandra Ximena Carvajal Quintero,
Universidad Nacional de Colombia Sede
Manizales.

Dr. Javier Fontalvo Alzate,
Universidad Nacional de Colombia Sede
Manizales.

Jorge Fernando Gutiérrez,
Universidad Nacional de Colombia Sede
Manizales

Armando Jaime Ustariz,
Universidad Nacional de Colombia Sede
Manizales.

Camilo Younes Velosa,
Universidad Nacional de Colombia Sede
Manizales.

CONTENIDO

04 Editorial

Artículos de investigación

- 05** Eficiencia energética mediante el balance de fases en sistemas de distribución en baja tensión. Solución desde un enfoque metaheurístico
Gustavo Schweickardt
- 19** Aplicación del mercado de carbono en pequeñas centrales hidroeléctricas
Eduardo Alexander Duque Grisales, Julián Alberto Patiño Murillo, Luis Diego Vélez Gómez.
- 33** Caracterización de la gestión energética en una empresa manufacturera de Manizales
Sara Restrepo, Julio César Mesa, Olga Lucía Ocampo, Luis Perdomo.
- 41** Flujo de potencia óptimo multiobjetivo para el análisis de sistemas de potencia con generación eólica.
Germán Andrés López, Edmarcio Antonio Belati, Alfeu Joãozinho Sguarezi.
- 49** Herramientas Lean para apoyar la implementación de sistemas de gestión de la energía basados en ISO 50001
David Bernardo Rojas Rodríguez, Omar Prías Caicedo.
- 61** Modelo estratégico de innovación para impulsar la gestión energética en Colombia.
Omar Prias C., Diana Montaña B.
- 69** Búsqueda exhaustiva de descriptores para mejorar el desempeño de las máquinas de soporte vectorial en localización de fallas
Debbie Johan Arredondo, Juan José Mora, Laura Melissa Román.
- 75** Hidroeléctricas y desarrollo local ¿mito o realidad? caso de estudio: Hidroituango
Maria Adelaida Torres, Humberto Caballero, Gabriel Awad.
- 85** Identificación mejorada de componentes en baja frecuencia de turbinas eólicas empleando EEMD e integración en el tiempo
Cesar Augusto Aguirre E., Juan Diego Mejia H., Oscar Cardona M., Germán Castellanos D.
- 93** Energías renovables y turismo comunitario: una apuesta conjunta para el desarrollo humano sostenible de las comunidades rurales.
Tania Jiménez Castilla.

CONTENT

04 Editorial

R esearch articles

- 05** **Energy efficiency by phase balancing in low voltage distribution systems. Solution from a metaheuristic approach**
Gustavo Schweickardt
- 19** **Application of carbon market for small hydro**
Eduardo Alexander Duque Grisales, Julián Alberto Patiño Murillo, Luis Diego Vélez Gómez.
- 33** **Analysis of energy management in a manufacturing company from metalworking in Manizales**
Sara Restrepo, Julio César Mesa, Olga Lucía Ocampo, Luis Perdomo.
- 41** **Multiobjective optimal power flow for the analysis of power systems with wind generation.**
Germán Andrés López, Edmario Antonio Belati, Alfeu Joãozinho Sguarezi.
- 49** **Lean tools to support the implementation of energy management systems based on ISO 50001**
David Bernardo Rojas Rodríguez, Omar Prías Caicedo.
- 61** **Strategic innovation model to boost the energy management in Colombia**
Omar Prias C., Diana Montaña B.
- 69** **Exhaustive search of input characteristics to improve the performance of support vector machines for fault location**
Debbie Johan Arredondo, Juan José Mora, Laura Melissa Román.
- 75** **Hydropower and local development: myth or reality?**
Maria Adelaida Torres, Humberto Caballero, Gabriel Awad.
- 85** **Improvement of low frequency identification for wind turbines employing EEMD and time integration**
Cesar Augusto Aguirre E., Juan Diego Mejia H., Oscar Cardona M., Germán Castellanos D.
- 93** **Alternative Energy and Community Tourism: a Joint Commitment to Sustainable Human Development in Rural Communities**
Tania Jiménez Castilla.

EDITORIAL

Dr. Camilo Younes Velosa
Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales

Los retos de la humanidad de cara al futuro, especialmente hoy por hoy, están atravesados por dinámicas que involucran diferentes actividades y áreas del conocimiento. De acuerdo a los problemas de cada región del mundo, los retos son diferentes y variados. Si nos preguntamos como colombianos cuáles son los principales retos, sin lugar a duda diremos que los aspectos económicos y sociales de cara un país en posconflicto son las metas principales. En otros lugares sus prioridades estarán enmarcadas en otros aspectos sociales, políticos y económicos.

Hay sin embargo un aspecto que es transversal al ser humano en general, que ha sido su preocupación desde tiempos remotos y que ha trazado e incluso definido la posibilidad y viabilidad de su existencia y supervivencia en la tierra, en el pasado y en el futuro, este aspecto es la energía.

La energía en su concepción general es inherente a la materia y por ende a la existencia del universo, en todo lugar, visible o invisible, la energía está presente y marca definitivamente el devenir del cosmos. Sabemos que donde hay materia (o antimateria) hay energía; partiendo de esta concepción general, analizando qué permitió que la vida en la tierra existiera y posteriormente la especie humana, fue la capacidad efectiva de utilizar los recursos energéticos para que ésta se diera.

Al inicio, la supervivencia dependía en gran medida de quien controlara el fuego, maravillosamente planteada en aquél film llamado *La guerra del fuego*. Todo en nuestra existencia se basa en un balance energético de transformación de diferentes fuentes de energía en la posibilidad real de existir.

Esta realidad, por ser inherente al hombre y a la vida en general, pasa un poco desapercibida. Hoy por hoy es más conocido y de mayor impacto en la sociedad la dependencia energética en la que vivimos. Los recursos energéticos marcan la pauta de la economía mundial y sin éstos no tendíamos el avance tecnológico actualmente. Lo anterior nos permitió centrar nuestros esfuerzos en que la iniciativa creada en la Facultad de Minas hace ya varios años, donde se encontraba la Revista Energética inicialmente, pasara a manos de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura - FIA, donde ya estamos presentando la segunda edición de la Revista desde su relanzamiento.

Los esfuerzos en la FIA, una Facultad con variados intereses académicos, se han centrado en encontrar un nicho donde converjan la mayoría de intereses y ha sido sin duda la Revista Energética, donde tienen cabida todas las áreas curriculares.

Esta reciente edición tiene variados artículos, muchos de ellos fruto de otro esfuerzo que gira en torno de este proyecto académico, que hemos llamado Congreso Energética, cuya primera versión la llevamos a cabo el pasado mes de octubre y donde pudimos contar con invitados de varios países, principalmente latinoamericanos.

Así es que encontraremos artículos variados que versan sobre diferentes temáticas tales como eficiencia energética, mercados energéticos, innovación en energía, energías renovables, entre otras.

Esperamos que estos esfuerzos de difusión de la actividad científica en Colombia sobre energía, sean de buen recibo por la comunidad académica y podamos seguir aportando al desarrollo del país.

Eficiencia energética mediante el balance de fases en sistemas de distribución en baja tensión. Solución desde un enfoque metaheurístico

Energy Efficiency by Phase Balancing in Low Voltage Distribution Systems. Solution From a Metaheuristic Approach

Gustavo Schweickardt^{a*}

Recibido: agosto 27 de 2014
Recibido con revisión: septiembre 3 de 2014
Aceptado: septiembre 6 de 2014

^{a*}Universidad Tecnológica
Nacional, Facultad Regional
Concepción del Uruguay,

Ing. Pereira 676 - 3260,
Concepción del Uruguay, Argentina
Tel.: +(54) 3442 423898
gustavoschweickardt@conicet.gov.ar

Energética 44, diciembre (2014), pp. 5-17

ISSN 0120-9833 (impreso)
ISSN 2357 - 612X (en línea)
www.revistas.unal.edu.co/energetica
© Derechos Patrimoniales
Universidad Nacional de Colombia



RESUMEN

Los Algoritmos Metaheurísticos son ampliamente reconocidos como uno de los más exitosos enfoques para la solución de problemas de optimización combinatoria. Una de las más interesantes áreas de aplicación la constituyen los Sistemas de Potencia. En particular, los sistemas de distribución de energía eléctrica en términos de su planificación y operación. Este Artículo presenta dos enfoques metaheurísticos para resolver un típico problema de optimización combinatoria vinculado a la eficiencia energética: el balance de fases en un sistema de distribución en baja tensión. Primero es introducida una nueva metaheurística, denominada por el autor *Optimización Evolucionaria Difusa por Enjambre de Partículas con Topología Estrella Global/Individual*, sustentada en los principios de la inteligencia de grupo y estrategias de evolución, y que se extiende al dominio difuso para modelar una optimización multi-objetivo, apelando a una función de aptitud difusa. Luego, se presenta una simulación sobre un sistema real, y sus resultados son comparados con otro nuevo enfoque metaheurístico propuesto por el autor, denominado recocido simulado difuso, evidenciándose las ventajas de la *Optimización Evolucionaria Difusa por Enjambre de Partículas con Topología Estrella Global/Individual*.

PALABRAS CLAVE

Desbalance de cargas; distribución eléctrica; conjuntos difusos; eficiencia energética; enjambre de partículas; optimización.

ABSTRACT

Metaheuristics Algorithms are widely recognized as one of most practical approaches for combinatorial optimization problems. One the most interesting areas of application are the power systems. In particular, distribution systems planning and operation. This paper presents two metaheuristics approaches to solve a typical combinatorial optimization problem: the phase balancing in low voltage electric distribution systems. first, a new metaheuristic is introduced, called *Fuzzy Evolutionary Particle Swarm Optimization with Global/Individual Star Topology*, based in the swarm intelligence principles and evolution strategies, which is extended to fuzzy domain to modelling a multi-objective optimization, by means of a fuzzy fitness function. A simulation on a real system is presented, and advantages of this approach *Fuzzy Evolutionary Particle Swarm Optimization with Global/Individual Star Topology* with respect to another new metaheuristic, called simulated annealing, extended to fuzzy domain too (*FSA*) and proposed in this work, are evidenced.

KEYWORDS

Load Unbalance; Electric Distribution; Fuzzy Sets; Energy Efficiency; Particle Swarm; Optimization.

1. INTRODUCCIÓN

Los Algoritmos Metaheurísticos son ampliamente reconocidos en cuanto a su capacidad para resolver problemas de Optimización Combinatoria. Sin embargo, las formulaciones originales han sido orientadas a optimizaciones de un único objetivo o Mono-Objetivo. Diversas propuestas para su extensión al dominio Multi-Objetivo han sido introducidas en la literatura especializada, pero cada formulación exhibe ciertas desventajas particulares, así como limitaciones en todo intento de generalización, cuanto menos en los problemas asociados a los sistemas de potencia. Tal es el caso del abordado, para la aplicación de los algoritmos propuestos en el presente artículo: El balance de fases en los Sistemas de Distribución Eléctrica de Baja Tensión (SDEE BT). Como se ha demostrado en el artículo [Schweickardt G. & Miranda V., 2010], un enfoque clásico, aplicando programación lineal entera mixta, no es capaz de resolver un problema real de este tipo, aún planteado Mono-Objetivo, como se propone en [Zhu J., et. al., 1998]. Por esta razón, un enfoque desde los algoritmos metaheurísticos, podría constituir una excelente alternativa, tal y como resultó ser según los resultados que se presentan en la referencia citada, y que se mejoran en este artículo. Existe un significativo número de metaheurísticas o algoritmos metaheurísticos (términos que, en el contexto del presente escrito, serán empleados de manera indistinta) ampliamente difundidos en el estado del arte. Entre ellas pueden referirse, preservando su denominación en inglés, Genetic Algorithms (GA), Tabu Search (TS), Simulated Annealing (SA), Ant Colony Optimization (ACO) y Particle Swarm Optimization (PSO). Todas ellas han demostrado ser exitosas en la búsqueda de soluciones satisfactorias de problemas combinatorios Mono-Objetivo. Sin embargo, se tienen al menos dos aspectos de relevancia sometidos a discusión: **a)** Cómo modelar la mejor metaheurística Multi-Objetivo y **b)** Cómo diseñar una metaheurística auto-adaptativa, la cual suponga el menor número de parámetros a ser definidos externamente.

En este trabajo se presenta, siguiendo los lineamientos de las investigaciones desarrolladas en la referencia mencionada, una nueva metaheurística Multi-Objetivo, sustentada en los principios de los enjambres de partículas, *PSO*. Se sostienen, como se explicará, las ideas evolucionarias y auto-adaptativas introducidas en la *EPSO*, al igual que el modelado de una función Multi-Objetivo a optimizar empleando conjuntos difusos (*FEPSO*), ya empleados con éxito. La variante, de sustancial importancia en la mejora de la aptitud operativa del algoritmo, estriba en la Topología del Sistema de Partículas, al efecto de compartir información conforme los principios de la Inteligencia de Grupo. Aquí se introduce la idea de Topología Gobal/Individual, sosteniéndose la denominación en inglés al efecto de

preservar las siglas ya empleadas para identificar la meteheurística base, (*FEPSO*), por *Fuzzy Evolutionary Particle Swarm Optimization with Global/Individual Star Topology (FEPSO GIST)*, cuya traducción se corresponde con la denominación: *Optimización Evolucionaria Difusa por Enjambre de Partículas con Topología Estrella Global/Individual*. La misma se direcciona en el sentido general buscado: un algoritmo de optimización Multi-Objetivo y auto-adaptativo, con capacidades mejoradas respecto del *FEPSO*, en estos dos aspectos, que, como se dijo, constituyen parte de la discusión en el estado del arte. Adicionalmente a esta nueva metaheurística, y aquí por nueva debe entenderse que se altera la topología de comunicación del enjambre respecto de una metaheurística ya propuesta por el autor (*FEPSO*), se introduce una variante Multi-Objetivo de la metaheurística Simulated Annealing o Recocido Simulado, SA, extendida al dominio difuso para tratar con funciones Multi-Objetivo. La misma se identifica, por tanto, con la denominación *FSA (Fuzzy Simulated Annealing)*, que se corresponde con la traducción Recocido Simulado Difuso. La metaheurística SA, Mono-Objetivo, ha sido muy aplicada (Schweickardt G. y Miranda V., 2010), (Miranda et.al, 2008), en diferentes problemas de optimización vinculados a los SDEE. Por tanto, se la juzgó como pertinente a efecto de comparar resultados entre ambas: la *FEPSO GIST* y la *FSA*, en un problema de solución conocida: el balance de fases en un SDEEBT, de solución muy satisfactoria proporcionada por las metaheurísticas *FPSO* y *FEPSO*, introducidas por el autor en la referencia citada.

El trabajo, entonces, está organizado del modo siguiente: En primer lugar se describe el problema a abordar (Balance de Fases (BF) en un SDEE BT), dejando al lector referencias adecuadas para complementar ideas sobre las limitaciones que exhiben enfoques de optimización clásica, por caso, la Programación Lineal Entera Mixta, más algunas referencias bibliográficas relativas a los aspectos físicos-electrotécnicos del problema BF. En segundo lugar se presenta la metaheurística SA, su estrategia de búsqueda y elementos característicos. Luego se presenta el desarrollo que va desde la metaheurística *PSO Canónica* hasta la *EPSO*, de características auto-adaptativas. A partir de allí, se describe la modificación introducida en la Topología de Comunicación del Enjambre, al efecto de concebir la metaheurística, aún Mono-Objetivo, *EPSO GIST*. Posteriormente, se presentan las condiciones para extender estas dos metaheurísticas al *dominio difuso*, tomando como referencia los objetivos a optimizar en el problema de BF, propendiendo a optimizar funciones Multi-Objetivo. Son obtenidas las formulaciones de las metaheurísticas *FEPSO GIST* y *FSA*, según la Función de Aptitud Difusa concebida para el problema BF, sin pérdida de generalidad. Seguidamente, ambas metaheurísticas se aplican en un SDEE BT real, y sus resultados son comparados. Por último, se desarrollan las conclusiones más relevantes sobre los desarrollos presentados.

2. EL PROBLEMA DE DESBALANCE DE FASES EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA DE BAJA TENSIÓN

El SDEE BT parte de Centros de Transformación de Media Tensión a Baja Tensión (CT MT/BT), en los que se emplazan uno o más

transformadores, que presentan cierto número de salidas en BT. Dicho número aumenta con la potencia instalada. Desde cada salida (en un transformador para un CT tipo plataforma, de 315 [kVA], se tienen 4-6 salidas), parte un alimentador que, a su vez, tiene ramales en derivación, llamados secundarios (los cuales pueden tener derivaciones terciarias, y así siguiendo), conformándose una red independiente cuya topología de operación es radial. El sistema es trifásico, pero las cargas conectadas en los diferentes nodos, resultan, en su mayoría, monofásicas. Esto le confiere un carácter, si bien simétrico, desbalanceado. Significa que el sistema de BT, opera con cierto grado de desbalance en sus tres fases. En la Figura 1 a) se presenta un sistema trifásico de corrientes simétrico balanceado y en la b) un sistema simétrico desbalanceado.

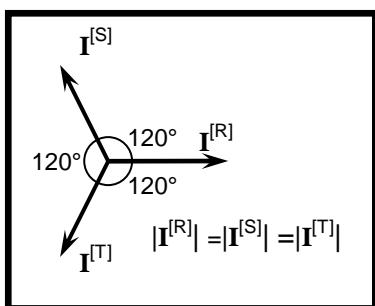


Figura 1a): Sistema Trifásico de Intensidades Simétrico y Balanceado (Perfecto)

Fuente. Elaboración propia

Sin embargo, en la medida que tal desbalance exhiba un grado más pronunciado, *se presentan, al menos, tres problemas relacionados con las pérdidas, la calidad del suministro y la confiabilidad del sistema:*

a) Existe un aumento en las pérdidas técnicas (potencia y energía) del sistema. En segmentos urbanos/suburbanos, para sistemas de BT que utilizan 0.38 [kV] de tensión nominal de suministro, el nivel de pérdidas técnicas de potencia se sitúa entre un 5 a 10%. El último valor se observa, mayormente, en zonas carenciadas, debido al tipo constructivo de red que se emplea (frecuentemente, conductores desnudos referidos como convencionales);

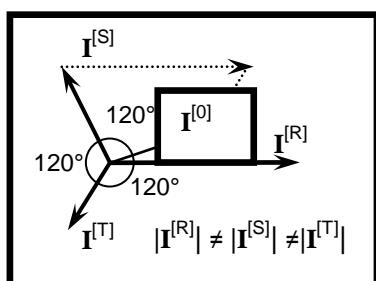


Figura 1b): Sistema Trifásico de Intensidades Simétrico y Desbalanceado

Fuente. Elaboración propia.

b) La calidad del producto técnico tensión de suministro, controlada por la regulación, disminuye. La tolerancia en tensión para redes como las descritas en el ítem anterior, está entre un 5% a 7% respecto de la tensión de suministro nominal.

c) El desbalance de intensidades, para sistemas con neutro puesto a tierra, genera una corriente de secuencia cero, $I^{[0]}$ (suma de las intensidades de las tres fases, que circulará por tierra) de un valor tal que puede accionar las protecciones contra cortocircuitos. Particularmente, el monofásico/fase a tierra (el más frecuente: un 80% de las fallas son de este tipo). Se observa que en la Figura 1 a) la suma fasorial (vectorial) de las intensidades es nula, mientras que en la 1 b) no lo es. El sistema pierde así confiabilidad, puesto que las protecciones interpretan los fuertes desbalances como una señal de cortocircuito, interrumpiendo el servicio. Esto adquiere mayor relevancia en el subsistema de MT: las cargas para el mismo resultan ser los CT MT/BT (sin considerar los grandes usuarios en MT, que son pocos, relativamente). Los desbalances en BT, se reflejan, entonces, “aguas arriba” como cargas desbalanceadas en MT. En este subsistema existen protecciones accionadas por componente homopolar mayor que cierto nivel de disparo, requiriéndose especial cuidado con su ajuste.

Entonces, el problema de optimización en el grado de desbalance de fases, es definido como *la búsqueda de aquella configuración de conexiones de las cargas a las fases [R, S, T] en el sistema, tal que propenda a evitar, en el mayor nivel posible, los inconvenientes descritos en a), b) y c)*. Como cada carga del sistema tiene tres opciones de conexión, se trata de un problema combinatorio, en rigor dado por las variaciones con repetición de las 3 fases tomadas de a nC cargas. El espacio de búsqueda tendrá, entonces, $NE = 3^{nC}$ estados. Para un sistema como el considerado en la simulación del presente trabajo, con $nC = 115$ cargas, se tiene un espacio de búsqueda de $NE = 3^{115}$ estados.

Para las simulaciones de Flujos de Potencia Trifásico (Radial) y detalles físicos del problema, pueden consultarse las referencias [Schweickardt G. & Miranda V., 2010; Arrillaga J., et. al., 1991; Grainger J. & Stevenson W., 1996; Fortescue, C.L., 1918].

3. LA METAHEURÍSTICA SIMULATED ANNEALING

3.1. Simulated Annealing (SA) o Recocido Simulado.

El concepto de Simulated Annealing o Recocido Simulado, fue introducido en la Optimización Combinatoria por Kirkpatrick [Kirkpatrick, et. al., 1995]. SA se muestra como una metaheurística

flexible, una herramienta muy adecuada para resolver satisfactoriamente una gran variedad de problemas de optimización combinatoria. Se sustenta en la emulación o analogía del recocido de sólidos, conforme la idea de un modelo propuesto en un artículo publicado por Metropolis [Metropolis, et. al., 1953]. El algoritmo de Metrópolis, simula el enfriamiento de un material en un recipiente en alta temperatura. A este procedimiento se lo conoce como recocido (annealing). El mismo consiste en dos pasos: **a)** Primero, la temperatura del sistema es llevada a un estado de *máxima energía*; y **b)** Luego, la temperatura del sistema se disminuye lentamente hasta que se arriba a un estado de *mínima energía*, alcanzando el equilibrio térmico del sistema en cuestión. Las propiedades estructurales que finalmente adquiere el sistema en tal proceso, dependen, fundamentalmente, de la velocidad de enfriamiento. Si el mismo es suficientemente lento, se forman largos cristales identificatorios de cierta perfección estructural. Por el contrario, si el mismo es muy rápido, los cristales contendrán imperfecciones y la estructura resultará más vulnerable.

Cabe destacar que, sin introducir mayores detalles de tipo físico, el algoritmo de Metropolis trata al sistema como un conjunto de partículas, y éste es un punto común con la metaheurística *PSO Canónica* desde el cual serán comparadas las metaheurísticas *FEPSO GIST* y *FSA* aquí propuestas.

3.2. El algoritmo metaheurístico (SA)

Con el objeto de explicar cómo es concebida una metaheurística desde tal proceso de recocido, es aplicable una analogía entre el sistema físico, con un gran número de partículas sometidas a diferentes estados de energía, y un problema de optimización combinatoria. Se establece del modo siguiente:

- Las soluciones del problema de optimización combinatoria, son equivalentes a los estados del sistema físico.
- La aptitud asociada a los atributos sobre los que se mide el mérito de las soluciones, se corresponden con la energía asociada a los diferentes estados.
- El parámetro de control en el Problema Combinatorio, es equivalente a la temperatura del sistema físico; y **d.-** La evolución de las soluciones en el algoritmo, es simulada utilizando técnicas de muestreo probabilístico, que se soportan mediante la sucesiva generación de estados de energía.

El proceso, comienza, entonces, con un estado inicial, i , que es evaluado mediante una función de Energía, $E(i)$. Luego, mediante la generación y análisis de un segundo estado, j , cuya energía resultará $E(j)$, se ejecuta un *test de aceptación*. La aceptación del nuevo estado, j , depende de la probabilidad computada mediante la

expresión siguiente:

$$p(\text{accept } j) = \begin{cases} 1; & \text{si } E(j) \leq E(i) \\ e^{\frac{E(j)-E(i)}{c}}; & \text{si } E(j) \geq E(i) \end{cases} \quad (1)$$

Donde c es un número real positivo expresado por $c = kBx T$; kB es una constante (llamada Constante de Boltzmann en el Algoritmo de Metropolis) y T es la temperatura del sistema.

Un procedimiento para el Algoritmo metaheurístico SA, puede ser expresado, en lenguaje de pseudo-codificación, como sigue (ver explicación de parámetros al finalizar el procedimiento):

Minimizar $f(i)$ para $i \in S \rightarrow$ Espacio de Búsqueda

Comienzo Procedimiento SA

- 1 . Establecer un punto de referencia o partida (estado) $= i0$
- 2 . Establecer una Temperatura de Partida $T = T0$ y una Tasa de Enfriamiento: $0 < \alpha < 1$;
- 3 . Establecer NT (Número de Pruebas/Iteraciones por Nivel de Temperatura);
- 4 . **Mientras** la *Condición de Parada* no sea satisfecha, hacer
- 5 . **Para** $k \leftarrow 1$ hasta NT hacer
- 6 . Generar puntos de prueba, j , desde Si (vecinos a la solución i) utilizando la función $q(i, j)$;
- 7 . Aceptar la solución j -ésima con una probabilidad p (*accept j*) dada por la expresión (1); Fin **Para** Reducir la Temperatura mediante la regla $T \leftarrow Tx \alpha$;
- 8 . Fin **Mientras**

Fin Procedimiento SA

Si, es una Vecindad de la Solución i : un conjunto de puntos discretos, $\{j\}$, que satisfacen: $j \in Si \Leftrightarrow i \in Sj$ (están arbitrariamente próximos). La Función de Generación de tal vecindad en Si , especificada externamente conforme el problema abordado, es designada mediante $q(i, j)$.

4. INTELIGENCIA DE GRUPO (SWARM INTELLIGENCE - SI)

La Inteligencia de Grupo o (*Swarm Intelligence*), SI, refiere un tipo de inteligencia artificial, basado en el comportamiento de sistemas colectivos, auto-organizados. La expresión fue introducida en [Beni, G. & Wang, J., 1989]. El término *swarm* describió, a entender de Beni, el comportamiento de los autómatas celulares, los cuales exhiben características similares a las observables en ciertos sistemas biológicos, tales como los insectos. De esas características, Beni mencionó: la descentralización, no-sincronización y simplicidad en los movimientos de los miembros del grupo. Además este término, *swarm*, tiene una significación que lo trasciende: permite analizar el comportamiento social de grupos de individuos (peces, insectos, pájaros, etc.), identificando el tipo de configuración en sus sistemas de cooperación y auto-adaptación, al efecto de encontrar la manera óptima de alcanzar

un objetivo. La comunicación, según los biólogos, constituye el parámetro clave en este proceso, de modo que a las cualidades mencionadas: descentralización, no-sincronización y simplicidad en los movimientos, debe incorporársele la cooperación entre los individuos del *swarm*.

Desde tales consideraciones, pueden ser establecidos *cinco principios* que caracterizan la Inteligencia de Grupo - IG (*Swarm Intelligence Principles*). Los mismos son reconocidos como aspectos fundamentales en las estrategias mimetizadas de optimización, que se sustentan en el esfuerzo cooperativo, por medio de la comunicación entre los individuos del grupo, en la búsqueda de soluciones.

Estos principios, y su breve enunciación, resultan: a) Proximidad: Promueve la habilidad que debe exhibir el grupo, para ejecutar cálculos simples de espacio y tiempo en sus movimientos hacia el objetivo pretendido; b) Calidad: Promueve la habilidad del grupo para responder a los factores que induzcan mejoras en la aptitud de sus individuos, en el espacio de soluciones; c) Diversidad de Respuesta: Promueve la posibilidad de que los individuos tengan respuestas diferentes ante los mismos estímulos; d) Estabilidad: Promueve la habilidad de que el grupo permanezca estable, en ausencia de estímulos que induzcan mejoras en las soluciones alcanzadas; y e) Adaptación: Constituye un aspecto complementario de la Estabilidad, puesto que promueve la habilidad de que los individuos reaccionen ante cualquier cambio en la aptitud de las soluciones alcanzadas.

5. LA METAHEURÍSTICA PSO

5.1. PSO Clásico o Canónico

La Optimización por Enjambre de Partículas (*Particle Swarm Optimization - PSO*), constituye un algoritmo metaheurístico presentado en [Kennedy J., Eberhart R.C. ,1995]. Se inspira en el movimiento colectivo de cardúmenes de peces, bandadas de pájaros o enjambres de abejas, el cual los autores refieren como movimiento de partículas.

En el modelo *PSO Cánónico* existe, en cada iteración hacia la solución buscada, un conjunto de alternativas (cuya factibilidad exhibe cierto grado de aptitud), las cuales son denominadas *partículas*. El conjunto es la población o *enjambre*. Desde una iteración a la siguiente, cada partícula se mueve en el espacio de búsqueda, conforme a cierta *regla de movimiento* que depende de *tres factores*, que se explican a continuación. Se indicará mediante \mathbf{p} el vector de partículas en movimiento, de modo que p_i resultará una partícula individual de las n que pertenecen al enjambre. Adicionalmente, se indicará mediante \mathbf{b} el vector de las mejores posiciones (cada posición es, a su vez, un vector) que las partículas han alcanzado individualmente en las iteraciones anteriores (aspecto referido en el modelo como vida pasada de la partícula); entonces \mathbf{b}_i se corresponderá con el óptimo individual de la partícula i en su vida pasada. Del mismo modo, se indicará mediante \mathbf{b}_G el vector cuyos elementos son las mejores posiciones globalmente alcanzadas por el conjunto de partículas

en las iteraciones anteriores; entonces se indicará mediante \mathbf{b}_G al óptimo global alcanzado por el sistema de partículas hasta la iteración presente. Dado el vector que indica la posición de las partículas en cierta iteración k , \mathbf{X}^k , el cambio de posición en la iteración siguiente, $k+1$, para la partícula i -ésima, resultará de la siguiente regla de movimiento:

$$\mathbf{X}^{[k+1]}_i = \mathbf{X}^{[k]}_i + \mathbf{V}^{[k+1]}_i \Delta t \quad (2)$$

Dónde el término $\mathbf{V}^{[k+1]}_i$ es referido como velocidad de la partícula i -ésima; Δt es el paso de iteración (simil temporal) e igual a la unidad. De modo que es más frecuente encontrar la expresión:

$$\mathbf{X}^{[k+1]}_i = \mathbf{X}^{[k]}_i + \mathbf{V}^{[k+1]}_i \quad (3)$$

El vector velocidad para la partícula i -ésima, se expresa como sigue:

$$\begin{aligned} \mathbf{V}^{[k+1]}_i &= \mathbf{V}^{[k]}_i + w_C x (r_1^{[k]}) x [\mathbf{b}^{[k]}_i - \mathbf{X}^{[k]}_i] + w_S x \\ &(r_2^{[k]}) x [\mathbf{b}^{[k]}_G - \mathbf{X}^{[k]}_i] \end{aligned} \quad (4)$$

En (4), representa la *inercia* o hábito de la partícula i : tiende a mantener su movimiento, para la iteración $k+1$, en la dirección en la que se movía en la iteración k . El segundo término representa la *memoria* o *capacidad cognitiva* de la partícula i : es atraída por el mejor punto del espacio de búsqueda alcanzado individualmente en su vida pasada; y el tercer término representa la cooperación entre el conjunto, o capacidad social, de la partícula i respecto del enjambre: las partículas comparten información sobre la mejor posición globalmente alcanzada por el enjambre. La incidencia de estos factores sobre cada partícula, está dada por las constantes o parámetros del modelo, $w_{C,S}$. El parámetro w_C recibe el nombre de *constante cognitiva* y el parámetro w_S se denomina *constante social* del enjambre. Intervienen los parámetros (r_1) y (r_2), los cuales son números aleatorios uniformemente distribuidos en $[0,1]$, $U[0,1]$, y cuyo objetivo es emular el comportamiento estocástico (un tanto impredecible), que exhibe la población o enjambre, en cada iteración k .

Se observa que, partiendo de la posición que cada partícula tiene en cierto “instante” o iteración k , $\mathbf{X}_{[k]}$, por composición vectorial de cada factor de influencia en el operador velocidad (inercia, memoria y cooperación) resulta la nueva posición $\mathbf{X}_{[k+1]}$. Nótese como cada partícula preserva, a través de la componente genérica $\mathbf{V}_{b[k]}$, su memoria a la mejor posición registrada hasta ese “instante” o iteración k , a la vez que todas cooperan compartiendo la información sobre la mejor posición global alcanzada por enjambre, según indica la componente genérica $\mathbf{V}_{G[k]}$.

Existen algunas variaciones, de interés para las propuestas del presente trabajo, sobre la forma *Canónica del PSO*. Se discuten brevemente en el epígrafe siguiente.

5.2. Modificaciones sobre el PSO Clásico. Función de decaimiento inercial y factor de restricción.

A) PSO con Función de Decaimiento Inercial: En esta forma, el operador velocidad, dado por la expresión (4), es modificado mediante la introducción de una función decreciente con el número de iteraciones, k , denominada Función de Inercia o de Decaimiento Inercial, $\delta(k)$. Su objeto es reducir, progresivamente, la importancia del término de inercia. La expresión (4) es, entonces, modificada sustituyendo el primer término por el producto entre una nueva constante, w_I , denominada *constante de inercia* y tal función $\delta(k)$:

$$\begin{aligned} \mathbf{V}^{[k+1]}_i &= \delta(k) x w_I x \mathbf{V}^{[k]}_i + w_C x (r_1^{[k]}) x [\mathbf{b}^{[k]}_i - \mathbf{X}^{[k]}_i] \\ &+ w_S x (r_2^{[k]}) x [\mathbf{b}^{[k]}_G - \mathbf{X}^{[k]}_i] \end{aligned} \quad (5)$$

Una forma típica para $\delta(k)$, está dada por la siguiente expresión lineal:

$$\delta(k) = w_{Max} - \frac{(w_{Max} - w_{Min})}{nTK} \times k \quad (6)$$

Donde k es la iteración actual; nTK es el número máximo de iteraciones de la metaheurística; y $[w_{Min}, w_{Max}]$ son dos constantes iniciales, máxima y mínima, cuyos valores típicos resultan ser 0,4 and 0,9 respectivamente.

La definición externa de la Función de Decaimiento Inercial requiere de cuidado, puesto que resulta intuitivo el hecho de que si el término de inercia resultase eliminado en iteraciones tempranas del algoritmo, el procedimiento corre el riesgo de quedar atrapado en una solución óptimo-local (o subóptima).

B) PSO con Factor de Constricción (χ -PSO): En este caso, el operador velocidad canónico se modifica como sigue:

$$\begin{aligned} \mathbf{V}^{[k+1]}_i &= \chi x \{ \mathbf{V}^{[k]}_i + \varphi_M x (r_1^{[k]}) x [\mathbf{b}^{[k]}_i - \mathbf{X}^{[k]}_i] + \\ &+ \varphi_C x (r_2^{[k]}) x [\mathbf{b}^{[k]}_G - \mathbf{X}^{[k]}_i] \} \end{aligned} \quad (7)$$

Donde χ se denomina Factor de Constricción, y se obtiene desde la siguiente expresión:

$$\chi = \frac{2 \times \kappa}{\left| 2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4 \times \varphi} \right|} \quad (8)$$

$$\text{Con } \varphi_M + \varphi_C = \varphi; \varphi > 4 \text{ y } 0 < \kappa \leq 1 \quad (9)$$

Dos configuraciones típicas para este conjunto de parámetros, resultan ser: a) $\varphi_M = \varphi_C = 2.05, \varphi = 4.1, \kappa = 1$ y $\chi = 0.729$; b) $\varphi_M = \varphi_C = 2.8, \varphi = 4.1, \kappa = 1$ y $\chi = 0.729$.

Esta variante del PSO, χ -PSO, será empleada en la simulación presentada.

6. LA METAHEURÍSTICA EPSO

La Optimización Evolucionaria por Enjambre de Partículas (*Evolutionary Particle Swarm Optimization - EPSO*) propuesta en [Miranda V, et al., 2008], constituye un algoritmo de optimización metaheurístico que integra los conceptos de Estrategias Evolutivas (*Evolution Strategic*) y Optimización de Enjambre de Partículas (*Particle Swarm Optimization*). Los autores proponen conferirle al PSO una capacidad auto-adaptativa, tal que permita a la metaheurística desarrollar un proceso de cambio de comportamiento, conforme resulte la evolución de las soluciones. La auto-adaptación, permitiría que, en cada iteración k , los parámetros que requieren de ajuste externo puedan adaptarse sin el riesgo referido de convergencia prematura a un óptimo local. El mecanismo del algoritmo *EPSO* se puede describir de la siguiente manera: para una iteración k del *PSO*, las partículas evolucionarán a lo largo de un cierto número de generaciones, según los siguientes operadores evolutivos: a) Replicación: cada partícula es replicada un número r de veces, generando partículas iguales a las existentes; b) Mutación: los parámetros estratégicos (constantes de inercia, cognitiva y social, esencialmente) son mutados (adoptan, en rigor, el carácter de parámetros con la iteración k); c) Evaluación: cada sucesor concebido a través de los pasos anteriores, es evaluado mediante la función de aptitud definida; d) Selección: mediante algún proceso (típicamente, el torneo estocástico), las mejores partículas sobreviven para formar la nueva generación, que se somete, en la iteración siguiente, a la nueva regla de movimiento. La ecuación evolutiva para la regla del movimiento en el *EPSO*, se sintetiza en la velocidad de la partícula i -ésima, entendiendo que la iteración k se corresponde con una nueva generación:

$$\begin{aligned} \mathbf{V}^{[k+1]}_i &= w_{iI}^{*[k]} x (r_1^{[k]}) x \mathbf{V}^{[k]}_i + w_{iC}^{*[k]} x (r_2^{[k]}) x \\ &\times [\mathbf{b}^{[k]}_i - \mathbf{X}^{[k]}_i] + w_{iS}^{*[k]} x (r_3^{[k]}) x [\mathbf{b}^{[k]}_G - \mathbf{X}^{[k]}_i] \end{aligned} \quad (10)$$

Donde el superíndice $(*)$, significa que los parámetros son evolutivos, producto de la mutación. La regla de mutación aplicable a las constantes w_{iI}, w_{iC}, w_{iS} tiene, como expresión general:

$$w_{iI, C, S}^{*[k+1]} = w_{iI, C, S}^{[k]} x [1 + \sigma x N(0, 1)] \quad (11)$$

en la cual: σ es un parámetro de aprendizaje, externamente fijado, que controla la amplitud de las mutaciones; $N(0, 1)$ es una variable aleatoria con distribución gaussiana de media 0 y varianza 1. Adicionalmente, el óptimo global también es perturbado en cada iteración, según la regla:

$$\mathbf{b}^{[k+1]}_G = \mathbf{b}^{[k]}_G + w_{iN}^{*[k]} x N(0, 1) \quad (12)$$

Donde $w_{iN}^{*[k]}$, es un cuarto parámetro estratégico de la regla de movimiento, que controla la amplitud del vecindario de $b^{[k]*}_G$ donde es más probable localizar la mejor solución global (entendida, al menos, como una solución mejor que la $b^{[k]*}_G$ actual, para la iteración k). El nuevo parámetro, como se indica con el superíndice (*), es también mutado según la regla (11). Se infiere que en la regla de movimiento modificada para el *EPSO*, el vector cooperación mutado no apuntará en la dirección de $b^{[k]*}_G$, sino de $b^{[k]*}_G$.

7. TOPOLOGÍA EN LA COMUNICACIÓN ENTRE PARTÍCULAS EPSO

Atendiendo al modo en el que se transmite la información entre cada partícula y el resto del enjambre, surgen las topologías global y local. Se asume que el modelo es síncrono es decir que todas las partículas se mueven en paralelo; en cada iteración se evalúa la aptitud de cada partícula, se actualiza su memoria y el conocimiento social y, a continuación, la población se desplaza hacia un nuevo punto tomando como referencia esta información. Respecto del criterio referido a las topologías, en *PSO* los individuos mejoran sus aptitudes imitando los comportamientos y tendencias que encuentran en los mejores congéneres de la población. Entonces, establecer cómo se define la vecindad de un individuo, o lo que es lo mismo, qué otros individuos le influencian, tiene una trascendencia vital en el rendimiento del algoritmo o, lo que es equivalente, en el grado de satisfacción de los cinco principios de la Inteligencia de Grupo, *IG*. Dependiendo de la topología que adquiera la población, la transmisión de la información entre individuos puede acelerarse o ralentizarse, lo cual está estrechamente relacionado con la velocidad de convergencia y con la capacidad del algoritmo para escapar de soluciones locales.

La topología más extendida es la topología de red global, en la cual todos los individuos están interrelacionados y tienen acceso inmediato a los hallazgos de sus congéneres. Sin embargo, esta estructura social resulta vulnerable a soluciones locales, dado que, dependiendo de la distribución puntual de las partículas sobre el espacio de soluciones, una de ellas, dirigida a una solución local, puede llegar a dominar al resto. La alternativa (más empleada), es la topología local, donde cada partícula orienta su trayectoria influida por sus (nv) vecinas adyacentes, quedando, en cierta medida, aislada de las partículas más alejadas del enjambre. De entre todas las (nv) vecinas, la partícula extrae las propiedades de aquella con mejor aptitud, utilizándolas para actualizar su vector velocidad y su vector posición. A los efectos de determinar el grado de vecindad de una partícula, lo más sencillo es elegir aquellas partículas topológicamente más próximas.

En las referencias citadas, el problema práctico elegido en el presente trabajo, ha sido resuelto con un modelo síncrono de topología global, con las variantes del *PSO* Clásico presentadas, extendiendo sus capacidades a la optimización Multi-Objetivo, mediante la formulación de una función de aptitud difusa. Análogamente, se ha empleado también la metaheurística *EPSO*.

Sin embargo, conforme la estructura que exhibe el espacio de búsqueda de un problema como el de Balance de Fases (muy pocos puntos aislados que satisfacen los umbrales impuestos en las magnitudes a optimizar), se plantea de qué manera podría incidir sobre los principios de la Inteligencia de Grupo, propiciando la disminución de tiempo en el hallazgo de buenas soluciones. Como se sugirió, el punto central parece estar en la forma o estructura solidaria a la comunicación de las partículas, y es por ello que se planteó, primero, una topología radial, la cual no brindó resultados diferentes. Entonces se introdujo una idea sustentada en la referencia [Miranda V., et. al., 2008], denominada Topología Estrella Estocástica Global. Su concepto altera los términos de la comunicación de aquella posición o partícula (solución) que ha alcanzado en cierta iteración, k , el Óptimo Global (*OG*), $b^{[k]*}_G$, que es un vector de tantas dimensiones como lo establece el espacio de búsqueda, según se dijo. En lugar de que todas las partículas se dejen influenciar del mismo modo por la que detenta el *OG*, conforme se aprecia en la Ecuación Evolutiva de Movimiento *EPSO*, (10), que se corresponde con una topología Global, se asigna una probabilidad de que dicho *OG* afecte o no a las restantes partículas del enjambre y su valor es una cuantía de afectación entre 0 y 1. Puede observarse que, con ello, se propicia al principio de Diversidad, enunciado en el epígrafe 4. dedicado a la *IG*.

Se introduce, entonces, una nueva topología para definir la comunicación entre partículas, propuesta en el presente artículo. Se sostiene la idea de Estrella Estocástica, en la vecindad del *OG* definida por probabilidades de comunicación no nulas. Pero se incorpora la probabilidad, que hasta el momento es nula, de que también las partículas incidan sobre otras informándoles de su posición. Por ello el nombre de *Topología Estrella (estocástica) Global/Individual*. Los Óptimos Individuales (*OI*) de las partículas del enjambre, tienen ahora cierta probabilidad, que puede ser nula, de incidir sobre el resto. Se introduce, para gobernar esta afectación, luego de diversas pruebas, propendiendo al principio Estabilidad de la *IG*, un Factor de Decaimiento cuya estructura es idéntica al de $\delta(k)$, presentado en la ecuación (6). Este factor multiplicativo, $\delta(k)$, va haciendo “decaer” la influencia de los óptimos individuales, *OI*, con probabilidades distintas de 0, desde cada partícula del enjambre hacia el resto, conforme aumenta el número de iteraciones. Con esto se logra una capacidad auto-adaptativa adicional en la metaheurística para espacios de búsqueda como el descrito: las partículas exhiben una mayor diversidad de posiciones en iteraciones tempranas, para luego dejarse influir por el *OG* evolutivo, a medida que el decaimiento de las incidencias estocásticas de los *OI*, se va sucediendo conforme aumenta el número de iteraciones. Así es concebida la metaheurística *EPSO GIST*, cuya Ecuación Evolutiva de Movimiento, viene

dada mediante la expresión:

$$\begin{aligned}
 V^{[k+1]}_i &= w_{iI}^{*[k]} x (r_I^{[k]}) x V^{[k]}_i + w_{iC}^{*[k]} x (r_2^{[k]}) \\
 &\quad x [b^{[k]}_i - X^{[k]}_i] + w_{iS}^{*[k]} x (r_3^{[k]}) x [b^{[k]}_j G - X^{[k]}_i] \\
 &\quad x \alpha OG^{[k]}_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n (\delta(k) x w_{iC}^{*[k]} x [b^{[k]}_j - X^{[k]}_i] \\
 &\quad x \alpha OI^{[k]}_i
 \end{aligned} \tag{13}$$

Donde: $\alpha OG^{[k]}_i$ es la probabilidad de que el Óptimo Global afecte al movimiento de la partícula i , en la iteración k y $\alpha OI^{[k]}_i$ es la probabilidad de que el Óptimo Individual de la partícula j , afecte al movimiento de la partícula $i, j \neq i$.

8. EXTENSIÓN DE LA FUNCIÓN DE APTITUD AL DOMINIO DIFUSO: FUNCIÓN MULTI-OBJETIVO

8.1. Conjuntos difusos objetivos y decisión estática maximizante

En este modelo se propone simular, previamente al desarrollo de las funciones de pertenencia solidarias a cada objetivo, Optimizaciones χ -PSO Mono-Objetivo. Esto es: *minimizar pérdidas*, *minimizar componente homopolar referida a la salida*, y *maximizar el Índice de Tensión fuera de Tolerancia*, respectiva e individualmente. Pueden, entonces, establecerse las referencias pertinentes que permitirán definir los correspondientes conjuntos difusos componentes de la función de aptitud para las metaheurísticas Multi-Objetivo.

8.2. Función de pertenencia para el conjunto difuso de las pérdidas (perd)

Las pérdidas (refiriéndonos aquí a las pérdidas de potencia activa) resultan, directamente, del Flujo de Potencia Radial Trifásico (FPRT). Sea $Minperd$, las pérdidas resultantes de la Optimización χ -PSO Mono-Objetivo, y $Refperd$ las pérdidas resultantes de correr un FPRT en la situación base. El conjunto difuso solidario a las *pérdidas*, tendrá la siguiente expresión condicional para su *función de pertenencia*:

$$\mu(perd) = 1; \text{ si } perd \leq Minperd \tag{14}$$

$$\begin{aligned}
 \mu(perd) &= [(Refperd - perd) / Refperd] p(perd); \text{ si} \\
 Minperd &\leq perd \leq Refperd
 \end{aligned} \tag{15}$$

$$\mu(perd) = 0; \text{ si } perd > Refperd \tag{16}$$

donde $p(perd)$ es un ponderador exponencial externamente fijado. Su efecto es la *contracción* (mayor importancia relativa del conjunto, en el proceso de decisión estática), si $p(perd) > 1$, o la *dilatación* (menor

importancia relativa), si $p(perd) < 1$, de $\mu(perd)$ sobre el resto de los objetivos.

8.3. Función de pertenencia para el Conjunto difuso de la componente homopolar (CH)

La componente homopolar, $I^{[0]}$, se obtiene como la suma de las tres corrientes de fase, $I^{[R]} + I^{[S]} + I^{[T]} = 3 \times I^{[0]}$, conforme el Teorema de Fortescue (Fortescue, 1918) (también llamado de las Componentes Simétricas) aplicado a sistemas trifásicos desbalanceados. El procedimiento que se ha seguido para su cálculo es el siguiente: **1ro** se suman las tres inyecciones (R, S, T), en cada nodo, obteniendo la componente homopolar que aportará cada uno de los mismos al retorno por tierra; **2do** este valor será equivalente a la suma, dividido 3, de las tres corrientes de salida para la primer rama. Por esta razón, el balance de intensidades, se dice referido a la salida del CT MT/BT. Su importancia estriba en que **a**) en BT, si se utilizasen, las protecciones principales que pueden interpretar un elevado valor de $I^{[0]}$ como falla, son instaladas en la salida del transformador y **b**) se busca que, “aguas arriba” (red de MT), el subsistema “vea” cargas con el menor grado de desbalance posible (CT MT/BT). Este criterio satisface lo dicho en el epígrafe 2., inciso **c**). Sea, entonces, $MinCH$ la componente homopolar resultante de la Optimización PSO Mono-Objetivo, y $RefCH$ la resultante de correr un FPRT en la situación base. Análogamente a las pérdidas, se tiene la siguiente expresión condicional de la *función de pertenencia* correspondiente al conjunto difuso *CH*:

$$\mu(I^{[0]}) = 1; \text{ si } I^{[0]} \leq MinCH \tag{17}$$

$$\begin{aligned}
 \mu(I^{[0]}) &= [(RefCH - I^{[0]}) / RefCH] p(I^{[0]}); \text{ si} \\
 MinCH \leq I^{[0]} &\leq RefCH
 \end{aligned} \tag{18}$$

$$\mu(I^{[0]}) = 0; \text{ si } I^{[0]} > RefCH \tag{19}$$

Lo dicho $p(perd)$ para vale también para $p(I^{[0]})$.

8.4. Función de pertenencia para el conjunto difuso del índice de tensión fuera de tolerancia (ITS)

El perfil de tensiones es también otro de los resultados que arroja el FPRT. En un sistema radial, y para los propósitos de este trabajo, basta con analizar qué módulos de tensión se tiene en los nodos terminales, puesto que “aguas arriba” (hacia el nodo de salida) del sistema, se tendrán valores mayores:

a) Se fijan: un *límite inaceptable* de tensión en los nodos terminales, $uInad$, y un *límite aceptable* en los mismos, uAd . Los empleados en la simulación son: $uInad = 0.92$ [pu] y $uAd = 0.95$ [pu]; **b)** Se definen los valores recíprocos de las tensiones límites especificadas en **a**): $v1 = 1/uAd$, y $v2 = 1/uInad$; **c)** Dado un valor de tensión, u , en cierto nodo terminal, nt , se calcula su recíproco, $vft = 1/u$. Luego, la expresión condicional para la *función de pertenencia* correspondiente al conjunto difuso tensión fuera de tolerancia, de variable vft , evaluada en el nodo terminal nt , resulta:

$$\mu(vft) = 1; \text{ si } vft \leq v1 \quad (20)$$

$$\mu(vft) = [(v2 - vft) / (v2 - v1)]^p(vft); \text{ si } v1 \leq vft \leq v2 \quad (21)$$

$$\mu(vft) = 0; \text{ si } vft > v2 \quad (22)$$

Lo dicho $p(perd)$ para vale también para $p(vft)$.

Finalmente, como Índice de Tensión fuera de Tolerancia, ITS , se propone la media geométrica de todos los valores $\mu_{nt}(vft)$ en el conjunto de los nodos terminales, $\{NT\}$:

$$\mu(Utf) = \sqrt[n_{NT}]{\prod_{nt=1}^{n_{NT}} i_{nt}(vft)} \quad (23)$$

8.5. Función de pertenencia para el conjunto difuso del número de cambios (NCf)

La inclusión de este objetivo, respeta el criterio de buscar la mejor solución con el menor número de cambios posibles, por razones de costos y tiempos de interrupción del servicio. La referencia correspondiente al número de cambios de fase, (NCf) se adopta desde el máximo de los resultantes en cada una de las optimizaciones PSO Mono-Objetivo. Entonces:

$$\text{Ref}NCf_{Max} = \text{MAX} \{NCf_{PSOMinperd}; NCf_{PSOMinCH}; NCf_{PSOMaxITS}\} \quad (24)$$

Se observa que el PSO Mono-Objetivo para maximizar el ITS , es requerido al efecto de lograr el valor de $NCf_{PSOMaxITS}$, no para componer $\mu(utf)$. $\text{Ref}NCf_{Max}$, constituye un *límite máximo admisible*, puesto que los cambios de fase son contabilizados respecto de la situación base, a la cual le corresponde $NCf = 0$. Para poder obtener un *límite mínimo admisible*, una posibilidad es obtener el mínimo de los valores de (24), al cual se le sustrae un cierto valor NCf_0 , fijado externamente:

$$\text{Ref}NCf_{Min} = \text{MIN} \{NCf_{PSOMinperd}; NCf_{PSOMinCH}; NCf_{PSOMaxITS}\} - NCf_0 \quad (25)$$

Luego, la expresión para la *función de pertenencia* correspondiente al conjunto difuso NCf , es la siguiente:

$$\mu(NCf) = 1; \text{ si } vft \leq v1 \quad (26)$$

$$\mu(NCf) = [(v2 - vft) / (v2 - v1)]^p(vft); \text{ si } v1 \leq vft \leq v2 \quad (27)$$

$$\mu(NCf) = 0; \text{ si } vft > v2 \quad (28)$$

Lo dicho $p(perd)$ para vale también para $p(NCf)$.

8.6. Decisión maximizante: La t-Norma producto de Einstein

Debe establecerse el *operador de confluencia* entre los conjuntos difusos, a efectos de obtener la *decisión maximizante* [Bellman & Zadeh, 1970] que definirá el valor de la *función difusa de aptitud*

en cada iteración del algoritmo. Para ello se emplea una *t-norma*, la cual es una función t definida en el intervalo $[0, 1]$ aplicado también en $[0, 1]$. Satisface las siguientes condiciones:

Si $t: [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ es una *t-norma*, entonces: a.- $t(0,0) = 0$; b.- $t(x,1) = x$ – *Condiciones de Frontera*; c.- $t(y,x) = t(y,x)$ – *Commutatividad*; c.- si $x \leq \alpha$ e $y \leq \beta \Rightarrow t(x,y) \leq t(\alpha,\beta)$ – *Monotonidad*; d.- $t(t(x,y),z) = t(x,t(y,z))$ – *Asociatividad*.

Para este problema específico, la *t-norma MIN*, comúnmente utilizada, no genera buenos resultados. La principal limitación estriba en que existen estados del espacio de búsqueda, en los cuales se mantienen en valores muy similares tres de los cuatro objetivos, mientras que el cuarto se modifica de manera importante, mejorando su aptitud individual. Al establecer la decisión maximizante mediante el *MIN*, la aptitud difusa casi no se modifica, ignorando lo que no sólo fue una mejor solución, sino lo que aportaría mejor información al enjambre para localizar soluciones superadoras. La *t-norma* que mejor resultados produjo en esta aplicación, es la referida como *Producto de Einstein*, y se define del siguiente modo:

$$t_{PEinstein}: (x,y) \rightarrow \frac{x \times y}{2 - (x + y - x \times y)} \quad (29)$$

donde x e y son funciones de pertenencia genéricas. Puede verificarse que $t_{PEinstein}$ satisface todas las condiciones a-d arriba enunciadas. Para el modelo presentado, desde la propiedad de *asociatividad*, d.-, se tiene el cálculo del *Producto de Einstein* mediante los siguientes pasos:

$$t_{PEinstein}^1 = \frac{\mu(perd) \times \mu(|I^{[0]}|)}{2 - (\mu(perd) + \mu(|I^{[0]}|) - \mu(perd) \times \mu(|I^{[0]}|))} \quad (30)$$

$$t_{PEinstein}^2 = \frac{t_{PEinstein}^1 \times \mu(utf)}{2 - (t_{PEinstein}^1 + \mu(utf)) - t_{PEinstein}^1 \times \mu(utf)} \quad (31)$$

y, por último:

$$i_D = \frac{t_{PEinstein}^2 \times \mu(ncf)}{2 - (t_{PEinstein}^2 + \mu(ncf)) - t_{PEinstein}^2 \times \mu(ncf)} \quad (32)$$

siendo:

$$\mu_D = t_{PEinstein} \{ \mu(perd); \mu(|I^{[0]}|); \mu_{nt}(utf); \mu(ncf) \} \quad (33)$$

La decisión maximizante que proporciona la aptitud difusa de la solución evaluada. El proceso iterativo

que implementa la metaheurística se detiene cuando la aptitud dada por (33), se mantiene sin cambios por cierto número de iteraciones $NItera$.

9. SIMULACIÓN

9.1. Sistema considerado

Es una salida real de un CT MT/BT en una de la ciudad de San Carlos de Bariloche. Las cargas son monofásicas. El esquema trifilar se presenta en la Figura 2.

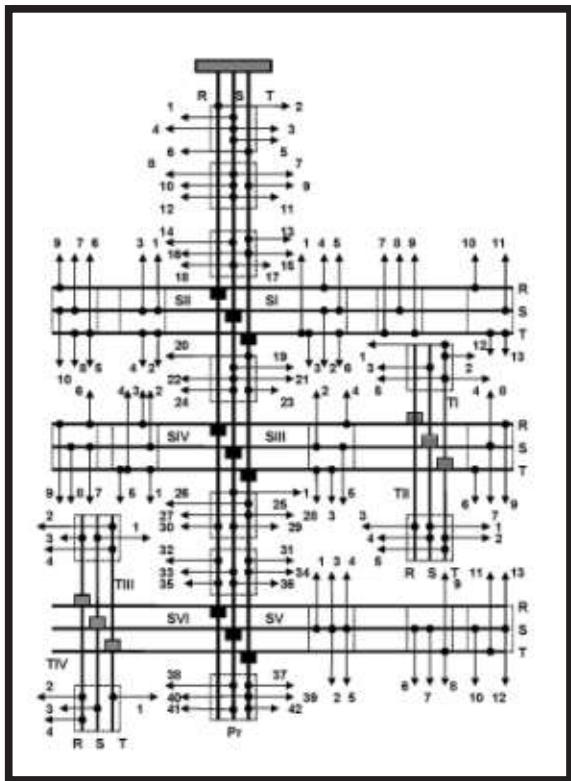


Figura 2: Esquema Trifilar de la Red/Salida CT MT/BT considerada en la Simulación. Sobrecargas Importantes en las Fases [S] y [T]

Fuente. Elaboración propia

9.2. Datos y resultados obtenidos

En el Cuadro1, se muestran los valores de las potencias

En el Cuadro1, se muestran los valores de las *potencias aparentes*, en [kVA], de cada carga, a factor de potencia constante, $\text{CosFi} = 0.8$.

Se ha considerado un *factor de simultaneidad* $Fs = (1/1.7) \approx 60\%$ en el pico de demanda. De este modo, todas las cargas son multiplicadas por este valor antes de proceder a los cálculos. Los conductores son del tipo preensamblado, siendo sus parámetros: *Alim Pr*: $3x95 \text{ [mm}^2\text{]}$, ($r = 0.372 + i xl = 0.0891 \text{ [}\Omega\text{]/[km]}$) y *Alim SI, SII, SIII, SIV, SV, SVI, TI, TII, TIII y TIV*: $3x35 \text{ [mm}^2\text{]}$, ($r = 1.39 + i xl = 0.0973 \text{ [}\Omega\text{]/[km]}$).

También se muestran los vectores de conexión resultantes en las Optimizaciones *PSO* Mono-Objetivo: **[fMPerd]**, **[fMI^[0]]**, **[fUft]** y (en letra itálica) el vector de conexión resultante para la Optimización *FPSO* MultiObjetivo, **[fPEJ]**. Las fases de conexión son [R, S, T]. Se utilizaron aplicaciones software desarrolladas por los autores en MATLAB, C++ y VB. El esquema *PSO* empleado responde a una Topología Global/Síncrona y la Ecuación de Movimiento incluye un Factor de Constricción, χ , ecuación (9). Como se dijo, las variables son las conexiones de las cargas y la dimensión del problema es $nC=115$ (existen 4 nodos derivadores). Los dominios para tales variables, son tres valores enteros [R=1, S=2, T=3].

Esta modalidad χ -*PSO* le confiere buena capacidad autoadaptativa al enjambre, para moverse en un espacio de búsqueda de 3^{115} estados, cuyas variables pueden adoptar valores en un intervalo discreto muy reducido. En el Cuadro2, se presentan los resultados numéricos obtenidos, parámetros de las funciones de pertenencia, número de partículas del enjambre y tiempos de ejecución. Un aspecto que debe remarcarse en este modelo, es la introducción de un procedimiento *bootstrap* o *de arranque* para las iteraciones tempranas del χ -*PSOMax* $\mu(Uft)$ y en la metaheurística *FSA*, *pero no en la FEPSON GIST*. El perfil de tensiones admisible, es casi una “rareza” en el espacio de búsqueda. Existirán muy pocos vectores de conexión que podrán satisfacerlo. Por tal motivo, por ejemplo, si se comienza el χ -*PSO* en el caso mencionado, al ser el Indice, $\mu(Uft)$, estricto (no se admite ningún nodo con tensión en módulo inferior a $uInad$), las aptitudes resultarán cero.

Como tanto la *mejor posición global* como la *individual* de cada partícula del enjambre, reciben esta información, es muy improbable que conciban una dirección hacia donde el enjambre, en promedio, deba moverse, tal que $\mu(Uft) > 0$. Como resultado, se tiene una convergencia prematura hacia un valor de aptitud 0, que nada dice sobre las mejoras pretendidas en los objetivos. Por ello, el *bootstrapping* en las iteraciones tempranas, se basa en otro indicador de $\mu(Uft)$, que, simplemente, cuenta el número de nodos terminales del sistema que se encuentran fuera de tolerancia, $Nnft$. La nueva función de pertenencia, se propone como: $\mu(Uft)^* = e^{-[\zeta \times Nnft]}$, con $0 < \zeta \leq 1$. Se itera, entonces, evolucionando con estas soluciones y llevando, simultáneamente, el cálculo de $\mu(Uft)$. Cuando el OG alcanzado implique $\mu(Uft)^* > 0$, se cambia de $\mu(Uft)^*$ a $\mu(Uft)$, y se continúa el proceso tal como se explicó. Este *bootstrapping* o *arranque*, generó siempre muy buenos resultados. En cambio el *FEPSON GIST* pudo encontrar, en todas las simulaciones ejecutadas, y a expensas de la mejora en la Diversidad de sus soluciones proporcionada por su topología, un punto de referencia que rápidamente fue comunicado al resto de las partículas, sin que las mismas fuesen impelidas hacia él, en iteraciones tempranas, continuando la mejora en la solución primigenia respecto del OG, y en tiempos menores, como se observa en el Cuadro2.

El algoritmo *FEPSON GIST*, ss descripto en el diagrama de flujo de la Figura 3. *NIterMax* es el máximo número de iteraciones, externamente fijado. También, en la misma Figura 3, es posible observar el flujo de tareas que corresponde al χ -*PSO* aplicado en cada optimización individual, Mono-Objetivo.

Para ello, deben omitirse los procesos denominados **MObjetivo** (metaheurística Multi-Objetivo) y **Operadores Evolutivos** en tal diagrama. $\delta(k)$ decrece un 5% por iteración, partiendo de $\delta(0)=1$. Por otro lado, los parámetros empleados en la metaheurística *FSA*, son listados a continuación: a) Temperatura Inicial: $T_0 = 1.0$; b) Número de Iteraciones para la misma Temperatura: $NT=100$; c) Máximo Número de Iteraciones sin mejorar la Función de Aptitud, FA (condición de parada del Algoritmo *FSA*): $nMaxI = 300$; d) Tasa de Enfriamiento: $\alpha = 0.8$; e) Función de Generación de la Vecindad para cierto estado i , $q(i, j)$: Se sustenta en la selección, aleatoria, de una carga monofásica que es conectada en cualquier otra fase del sistema; f) Constante kB (para la determinación de c , en la expresión (1)): $kB = 0.00025$.

La Misma Función de Aptitud Difusa que para el FEPSO GIST,

$i_D = t_{Peinstein} \{ \mu(\text{perd}); \mu(|I^{[0]}|); \mu_{nt}(vft); \mu(ncf) \}$, es evaluada a partir de los resultados de un Flujo de Potencia Trifásico.

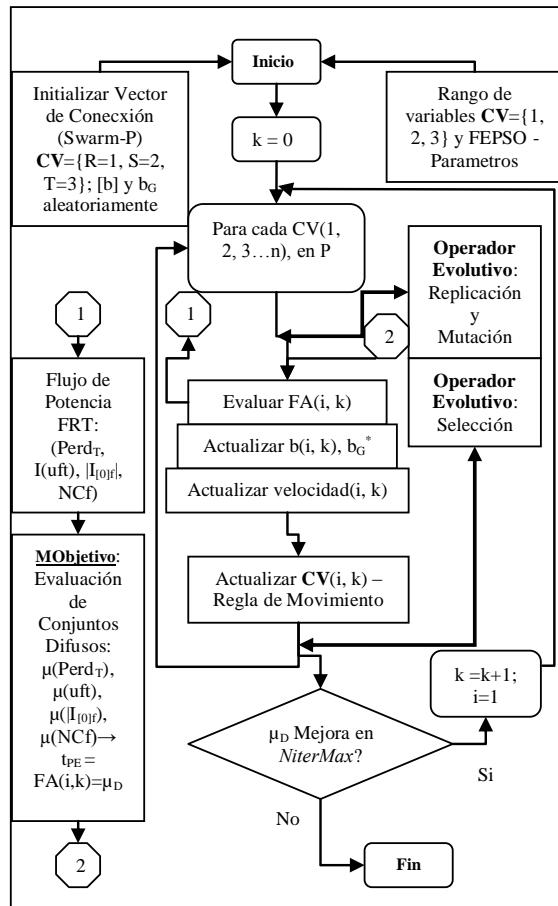


Figura 3: Esquema *FEPSO GIST* para la Simulación para la Optimización del Grado de Desbalance de Fases del Sistema esquematizado en la Figura2. Cada $\mathbf{Vc}(1,2,3)$ es una *partícula en la población, P*, vC es cada *variable de conexión*

Fuente. Elaboración propia

Por último, a los fines de comparar la diferencia entre las metaheurísticas χ -*PSO* y *FEPSO GIST*, respecto de la dirección hacia el OG en cada partícula, obtenida de su correspondiente Ecuación de Movimiento, Se presenta la Figuras 4.

10. CONCLUSIONES

1ra) Se ha presentado una novedosa metaheurística, *FEPSO GIST* Multi-Objetivo, para resolver el problema del desbalance de fases en SDEE trifásicos de Baja Tensión, propendiendo a la Eficiencia Energética del Lado de la Oferta. El Cuadro 2 muestra, respecto de la situación base del sistema real considerado, los muy buenos resultados obtenidos.

2da) En la metaheurística *FEPSO GIST* no es necesaria la inclusión del procedimiento bootstrap o de arranque, al que se recurre en el Algoritmo *FSA*, dadas las mayores capacidades autoadaptativas y las mejoras introducidas en los cinco principios de la Inteligencia de Grupo.

3ra) Cabe destacar la comparación que puede realizarse entre las metaheurísticas *FPSO* y *FEPSO* empleadas para resolver este problema, y observar cómo la topología *GIST*, permite resolverlo más rápido, con un menor número de parámetros a controlar externamente. Esta constituye una línea de investigación que, a juicio del autor, debería ser profundizada.

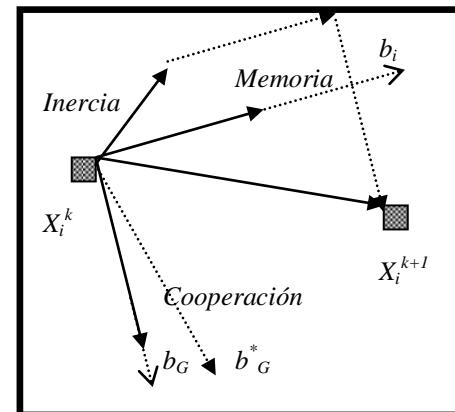


Figura 4: Óptimo Global, OG, b_G en χ -*PSO* y b_G^* en *FEPSO GIST*. Efecto de la Mutación EPSO

Fuente. Elaboración Propia

REFERENCIAS

- Arrillaga J., Arnold C., Harker B. (1991): "Computer Modelling of Electrical Power". John Wiley & Sons, pgs 90-123. ISBN 0-471-110406-X.
- Bellman, R.; Zadeh, L. (1970): "Decision-Making in a Fuzzy Environment". *Management Science*, 17, pgs. 141-164.
- Beni, G.; Wang, J. (1989). "Swarm Intelligence in Cellular Robotic Systems", in: *Proceedings NATO Advanced Workshop on Robots and Biological Systems*, June (26-30), Italy: Tuscany.
- Fortescue, C.L. (1918), "Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks", *Trans. AIEE*: pgs. 1027-1140.
- Grainger J., Stevenson W. (1996): "Power Systems Analisys". Mc. Graw Hill, U.S.A. ISBN 0-07-061293-5.
- Kennedy, J.; Eberhart, R.C. (1995): "Particle Swarm Optimization", *IEEE International Conference on Neural Networks*. Perth, Australia. IEEE Service Center, Piscataway, NJ.
- Kirkpatrick S., Gellat C., and Vecchi M. (1995), "Optimization by Simulated Annealing", *Science*, Vol. 220, No. 4598, pp. 671-680.
- Metropolis N., Rosenbluth A., Teller A., and Teller E. (1953), "Equation of state calculation by fast ComputingMachines", *Journal of Chemical Physics*, 21, pp. 1087-1092.
- Miranda V., Keko H., and Duque Jaramillo A. (2008), "EPSO: Evolutionary Particle Swarms. In Adavances in Evolutionary Computing for System Design". Jain L., Palade V., Srinivasan D. Eds., Springer series in Computational Intelligence, vol. 66, pp. 139-168.
- Schweickardt G., Miranda V. (2010): "Metaheurística FEPSO aplicada a problemasde Optimización Combinatoria: Balance deFases en Sistemas de Distribución Eléctrica". *Revista Ciencia, Docencia y Tecnología*, Universidad Nacional de Entre Ríos, Año XXI, nro. 40, p. 133-163.
- Zhu J., Griff B., Chow M. (1998): "Phase Balancing Using Mixed-Integer Programming". *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 13, nro. 4.

Aplicación del mercado de carbono en pequeñas centrales hidroeléctricas

Application of Carbon Market for Small Hydro

Eduardo Alexander Duque - Grisales^{a*}, Julián Alberto Patiño - Murillo^b, Luis Diego Vélez - Gómez^b

RESUMEN

Recibido: agosto 15 de 2014
Recibido con revisión: septiembre 26 de 2014
Aceptado: septiembre 29 de 2014

Con la creación del Protocolo de Kioto se introdujo en la sociedad una nueva preocupación acerca de la necesidad de limitar la cantidad de emisiones de *Gases de Efecto Invernadero*. Esta preocupación ha llevado a la creación de un nuevo mercado: el Mercado de Carbono, escenario a través del cual se desea crear un precio común para este elemento. En este mercado se otorga un tipo de bonos llamados *certificados de reducción de emisiones* a los proyectos que por su actividad reducen la cantidad de Gases de Efecto Invernadero. Los proyectos hidroeléctricos se encuentran entre los más susceptibles de recibir este tipo de incentivos. Aunque este tipo de iniciativas son muy frecuentes en países como Brasil, Chile y los países centroamericanos, en Colombia el número relativamente escaso de proyectos bajo el *Mecanismo de Desarrollo Limpio* contrasta con el amplio potencial hidroenergético disponible. Este trabajo explora la aplicación de algunas metodologías existentes para la valoración económica de las emisiones reducidas en proyectos hidroeléctricos y su impacto en el sector eléctrico colombiano.

PALABRAS CLAVE

Mercados de carbono; Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL); central hidroeléctrica.

ABSTRACT

With the creation of Kyoto Protocol, a new concern about the urgent need to limit the amount of emissions of green house gases was introduced into society. This concern has led to the creation of a new market: the Carbon Market scenario through which the society wants to create a common price for this element. This kind of market provides a type of so-called Certified Emission Reductions, to the projects that by their activity reduce the amount of green house gases. Hydropower projects are among the most likely to receive this type of financial incentive. Although such initiatives are very common in countries like Brazil, Chile and Central America, in Colombia, the small number of projects under this kind of feature of Clean Development Mechanism, contrast to the large hydropower potential available. This work explores the application level of the some existing methodologies for economic valuation of reduced emissions by hydroelectric projects and their impact on the Colombian electricity sector.

KEYWORDS

Carbon Market; Clean Development Mechanism (CDM); Hydroelectric Power.

^a*Institución Universitaria Esumer,
Facultad de Estudios Empresariales y
de Mercadeo Medellín,
Calle 76 No. 80-126
Carretera al Mar, Medellín, Colombia.
Tel.: + 57(4) 4038130
eduardo.duque@esumer.edu.co

^bUniversidad Nacional de Colombia,
Facultad de Minas,
Calle 59A No 63 - 20
Medellín, Colombia.
Tel.: + 57(4) 4255287
japatin0@unal.edu.co
lvelez@unal.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El mundo cuestiona la generación eléctrica con combustibles fósiles por la emisión de dióxido de carbono, que tiene incidencia en el efecto invernadero y el cambio climático. Las variaciones ambientales que se producen a nivel global han planteado la responsabilidad que deben asumir las naciones, y en especial los actores del sector industrial y empresarial como principales agentes de este cambio [UNFCCC, 2013; Vitousek, 1992]. Este fenómeno ha llevado a la creación de un nuevo mercado: el Mercado de Carbono, un sistema de comercialización de reducciones de emisiones. Este mercado representa el lugar mediante el cual los gobiernos, empresas o instituciones pueden comprar y vender reducciones de gases efecto invernadero (GEI). Los aprovechamientos hidroeléctricos se encuentran entre los más populares de los proyectos susceptibles de recibir certificados de reducción de emisiones [World Bank Institute, 2012].

El *mercado de carbono* surgió para incorporar diferencias entre naciones en el costo de reducción de GEI, al aprovechar los menores costos marginales de aquellos que pueden ser oferentes y el interés de quienes participan como compradores. En efecto, los países industrializados, por lo general, cuentan con tecnologías más eficientes, razón por la cual el costo de oportunidad de reducir las emisiones de GEI en esos países resulta mayor al costo de realizar dichas inversiones en países en vías de desarrollo. Por tanto, este mercado ha creado una serie de oportunidades para los países que, como Colombia, se encuentran en desarrollo, dado que permite apoyar proyectos registrados bajo el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) y generar ingresos adicionales a los que podrían derivarse de un determinado proyecto de inversión o negocio, así como acceder a tecnología amigable con el medio ambiente.

Una de las instalaciones más contaminantes con dióxido de carbono (CO_2) es una planta de generación de electricidad que consuma carbón, y, por esa razón, se le utiliza como patrón de comparación. De esta manera, un proyecto que produzca o utilice energía limpia evitará la emisión de carbono en forma proporcional a la cantidad generada por dicha planta. Bajo esta premisa, las centrales hidroeléctricas son consideradas como energía renovable con cero emisiones de GEI [Martins, et al., 2013; Zhou, et al., 2009]. Sin embargo, se debe tener en cuenta que los proyectos hidroeléctricos presentan un impacto ambiental negativo en su construcción, generado por las alteraciones en los usos del suelo y por la implementación nuevas obras. Los embalses de plantas hidroeléctricas en las zonas tropicales contribuyen con las emisiones a la atmósfera de GEI, y en particular de CH_4 y CO_2 . Varios autores [Abril et al., 2005; Barros & Tiago Filho, 2012; Devault, et al., 2007; Murtishaw, et al., 2006; van de Vate, 1997] han llevado

a cabo estudios de las emisiones de gases de efecto invernadero y de los diferentes impactos ambientales producidos por embalses artificiales [Devault et al., 2009].

Colombia, y más específicamente Antioquia, tienen un potencial hidroeléctrico abundante y de buena calidad, gracias a la afortunada combinación de aguas ricas en caudal y regulación natural, caídas topográficas abundantes y condiciones geológicas estables en el subsuelo. Así mismo, cuenta con aceptable infraestructura de conectividad tanto vial como eléctrica para facilitar acceso a zonas de proyectos y permitir el transporte de la energía producida.

En Antioquia se han tenido experiencias positivas con MDL. Empresas Públicas de Medellín ha vendido bonos de la central eólica Jepirachi e invertido parte de los ingresos en obras de beneficio de la comunidad indígena wayuu y avanza en el proceso de vender la reducción de emisiones de las centrales La Vuelta y La Herradura. Generadora Unión ha vendido reducción de emisiones de la hidroeléctrica Agua Fresca, en Jericó, y ha cedido al municipio el 20% de esos ingresos, con los que se ha sostenido el jardín botánico de la población [BIRD, 2011]. También ha vendido las emisiones evitadas en la hidroeléctrica Amoyá, Tolima, y le ha cedido a la comunidad una parte importante de los ingresos. Colinversiones está tramitando la venta de reducción de emisiones de Hidromontañas y se propone invertir parte de los ingresos en protección ambiental de la cuenca del río Grande [BIRD, 2011].

Estas características anteriormente mencionadas, permiten que las centrales hidroeléctricas en Antioquia presenten las condiciones necesarias para desarrollarse sustentablemente y beneficiarse de la emisión de bonos de carbono sin impactar negativamente el ambiente. Por otra parte, los aprovechamientos hidroeléctricos pueden utilizarse como un instrumento para generar recursos que apalanquen el desarrollo rural [Purohit, 2008], no solamente por medio de los mecanismos tradicionales de las transferencias y los impuestos que se pagan a los municipios y a las corporaciones autónomas regionales, sino también mediante la conformación de cadenas productivas en las regiones y la generación de recursos provenientes del Mecanismo de Desarrollo Limpio, a través de la venta de bonos de carbono.

Para cuantificar los bonos de carbono se pueden aplicar las metodologías aprobadas por la Convención Marco de las Naciones Unidas Contra el Cambio Climático (CMNUCC), según el cumplimiento de condiciones como el tipo y tamaño del proyecto, fuente de energía utilizada y ámbito sectorial, por mencionar algunas [World Bank Institute, 2012]. Estas metodologías son, en síntesis, modelos de valoración económica de emisiones que permiten determinar el potencial de reducción de emisiones de un proyecto.

El objetivo de este trabajo consiste en la aplicación de algunas metodologías existentes para la valoración económica de las emisiones reducidas en la central hidroeléctrica del Río Aures y su impacto en el sector eléctrico colombiano.

Este documento está organizado de la siguiente manera: El capítulo dos se concentra en introducir al lector en los conceptos básicos del Mercado de Carbono, permitiendo conocer su nacimiento y las características del mismo. El tercer capítulo está dedicado a discutir los avances y trabajos recientes en el tema de Mercado de Carbono en proyectos hidroeléctricos, resaltando las experiencias MDL en centrales hidroeléctricas en Colombia y América Latina. Finalmente, en el capítulo 4 se presenta una discusión sobre las oportunidades que tiene el Mercado de Bonos de Carbono para los proyectos hidroeléctricos en Colombia, en particular para la región de Antioquia y sus implicaciones tanto económicas como ambientales en sus localidades de origen. Al mismo tiempo, se plantean unos posibles estudios futuros.

2. LOS BONOS DE CARBONO PARA CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

El Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) del Protocolo de Kioto otorga un tipo de bonos llamados CERs a los proyectos que por su actividad reducen las emisiones de GEI, que pueden ser vendidos a actores industrializados como “permisos” para emitir más GEI del autorizado y comercializarlos en la bolsa de valores como bonos de carbono [PNUMA & UNFCCC, 2002]. Varios autores han discutido el uso de sistemas de energía renovables en lugar de sistemas de energía convencionales en proyectos MDL y sus impactos sociales, económicos y ambientales, mostrando tendencias a la reducción total de las emisiones como producto de la instalación de sistemas de energía renovable en zonas remotas [Mol, 2012; PNUMA & UNFCCC, 2002; World Bank Institute, 2009].

El mercado del MDL es un mercado regulado y creado por la regulación. Esto significa que los realizadores de proyectos MDL deben seguir reglas y procedimientos unificados y sistemáticos a fin de lograr la emisión de CERs, la cual es realizada centralizadamente por la Junta Ejecutiva del MDL, de acuerdo a los marcos formales establecidos en la UNFCCC.

2.1. Ciclo de los proyectos MDL

A continuación se describe el modelo general de valoración económica del Mecanismo de Desarrollo Limpio. Todo proyecto que busca ser acreditado como MDL debe seguir el mismo criterio y completar los mismos pasos para que pueda negociar sus reducciones cuantificadas de gases de efecto invernadero en el mercado de carbono. Este proceso se llama comúnmente el ciclo del proyecto MDL [Eiguren, 2004].

El primer paso es determinar si el proyecto es elegible como MDL y el último es la certificación y venta de los Certificados de Emisiones Reducidas. El CER representa una tonelada de CO₂ equivalente reducida certificada por la Junta ejecutiva del MDL¹ y por tanto válido para ser usado por los países con compromisos de reducción de GEI en el marco del Protocolo de Kioto [Tanwar, 2007].

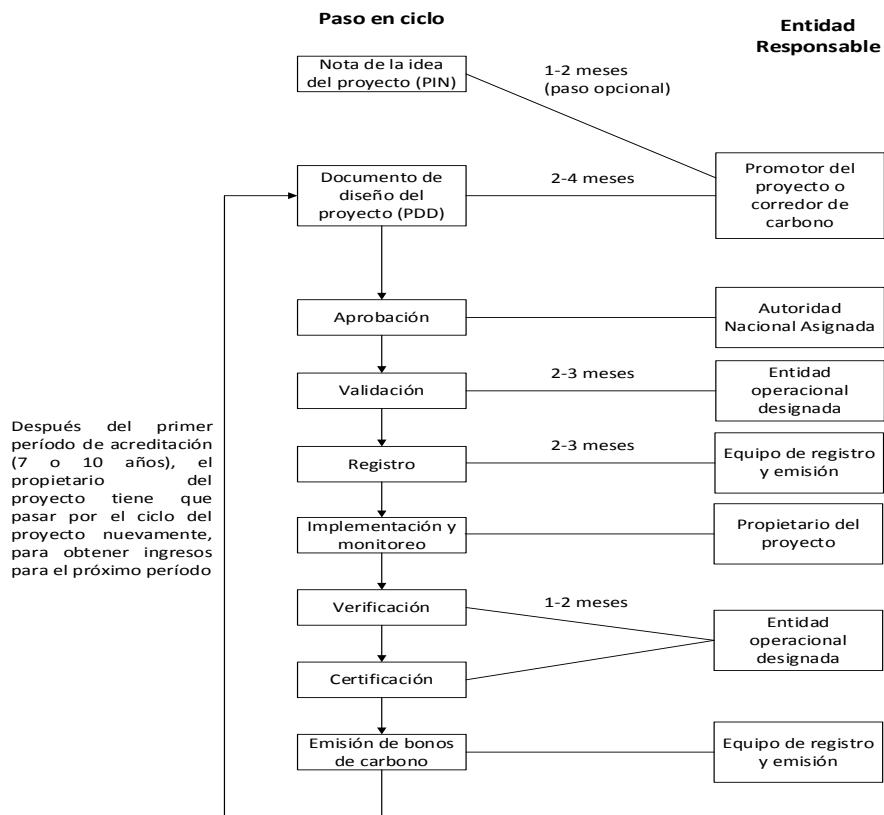
La cesión a la comunidad de una parte de los ingresos por la venta de los CER genera desarrollo y bienestar en la zona, facilita el proceso de aprobación y negociación de los certificados y reduce el componente de riesgo del país en los créditos para los proyectos. Esta venta de certificados de reducción de emisiones de dióxido de carbono representa una buena oportunidad de ingresos y beneficios sociales para Colombia, en especial si se aprovecha con las pequeñas y medianas centrales hidroeléctricas [BIRD, 2011].

2.2. Experiencias MDL para centrales hidroeléctricas en América Latina y Colombia

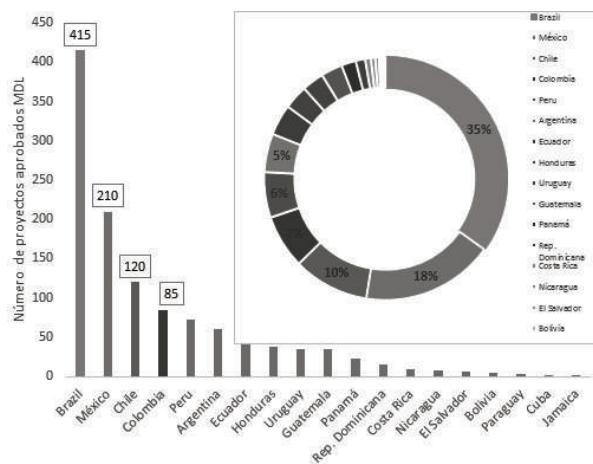
Latinoamérica se ha convertido en el principal proveedor de proyectos MDL en el mundo debido, entre otras cosas, al apoyo institucional por parte de los gobiernos de la región con la implementación del Protocolo de Kioto, a contar con sistemas de aprobación de proyectos MDL funcionando favorablemente, y a la presencia de expertos locales en las instituciones de promoción del MDL. Entre estos proyectos se encuentran los aprovechamientos hidroeléctricos como proyectos susceptibles de recibir certificados de bonos de carbono [Aragón, 2008].

Diversos autores [Abril et al., 2005; Martins, et al., 2013; UNEP, 2004; Van Vuuren et al., 2003] han evaluado proyectos de pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) como candidatos para la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Tecnologías de energía renovable, que incluyen PCH, pueden contribuir a la sostenibilidad global a través de la mitigación de GEI [BIRD, 2011; Mol, 2012]. Además, estudios en países en desarrollo muestran que la inversión en tecnologías más eficientes, el uso racional de la energía y la sustitución de combustibles fósiles por renovables, reducen las emisiones de gases de efecto invernadero. Dado que las PCH representen una fuente de energía renovable, con una reducción de las emisiones de GEI, es probable que el mercado MDL sea una fuente de oportunidad para su desarrollo [E. Lokey, 2009].

¹ La junta ejecutiva del MDL fue establecida por el artículo 12 del Protocolo de Kioto. Su función principal es supervisar el MDL y las entidades operacionales que certifican las reducciones de emisiones de proyectos del MDL

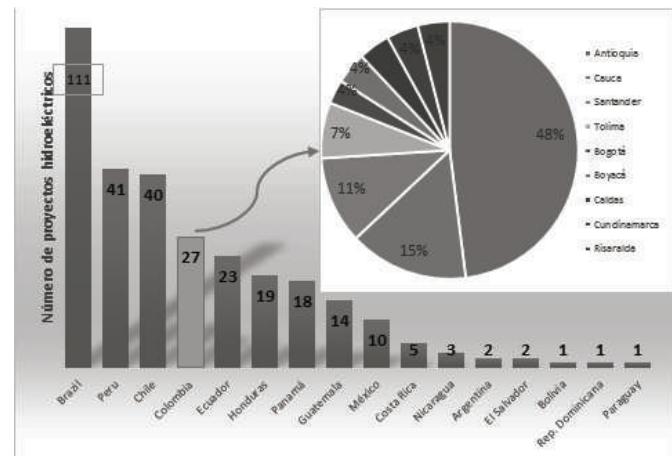
**Figura 1:** Ciclo del proyecto MDL

Fuente. [UNEP, 2004]

**Figura 2:** Proyectos MDL aprobados por la UNFCCC en América Latina.

Fuente. [UNFCCC, 2013] Elaboración propia

Hasta el año 2013, se tienen registrados ante la UNFCCC 317 proyectos hidroeléctricos de diferentes países de América Latina, de los cuales el 8,52% de los proyectos fueron presentados por Colombia [Forest Trends Association, 2013] (Ver Figura 3).

**Figura 3:** Proyectos hidroeléctricos registrados ante la UNFCCC en América Latina.

Fuente. [UNFCCC, 2013] Elaboración propia

La mayor participación de proyectos hidroeléctricos en la cartera de proyectos MDL de la región se debe, entre otras razones, a que son proyectos que generalmente reducen importantes cantidades de emisiones, lo que permite contar con ingresos importantes por su venta y costear los costos de transacción de la operación MDL [Barros & Tiago Filho, 2012]. Además, es relativamente sencillo calcular la cantidad de emisiones que reducirían así como

establecer el plan de monitoreo y verificación. Estos proyectos, y en general los proyectos de generación eléctrica interconectados a las redes eléctricas nacionales, como la mayoría de los eólicos, cuentan con criterios, desarrollados principalmente por el Banco Mundial, para establecer su potencial de agregación al sistema [Eguren, 2004].

2.3. Centrales Hidroeléctricas

El fuerte crecimiento de la demanda de energía en el mundo, y especialmente en Latinoamérica, ofrece grandes posibilidades de aprovechamiento de los recursos energéticos naturales. Según cifras de la Agencia Internacional de Energía (IEA) el consumo eléctrico en Latinoamérica alcanzó los 850,000 GWh (gigavatios-hora) en 2009, siendo la energía hidroeléctrica el mayor contribuyente a la producción de electricidad aportando el 65% del total. En Centro América esta cifra se eleva a más del 90% [International Energy Agency, 2013].

Una central hidroeléctrica consiste en la producción de energía eléctrica mediante el aprovechamiento detrás recursos naturales: agua disponible, diferencia de alturas y geología favorable. Un proyecto hidroeléctrico requiere el mayor rigor en sus estudios técnicos, ambientales financieros para determinar la factibilidad de su construcción y operación.

Los pasivos ambientales y su influencia directa en el costo del proyecto representan uno de los aspectos más relevantes a la hora de asumir la responsabilidad de iniciar la ejecución de una hidroeléctrica. De manera integral, desde un punto de vista objetivo, los pasivos deben ser identificados y valorados de tal forma que sea posible establecer sus impactos y las medidas para mitigarlos, en una negociación responsable y comprometida con la restauración ambiental [Purohit, 2008].

En los últimos años, el sector privado se ha venido incorporando al Sector Eléctrico Colombiano en los negocios de generación, distribución y transmisión de energía, los cuales han dado lugar a la realización de grandes proyectos que se desarrollan bajo un nuevo esquema institucional y regulatorio [UPME, 2009]. Para estos procesos de negociación, se hace necesario considerar la mayor cantidad posible de variables de tipo ambiental y social que implica la realización de un nuevo proyecto hidroeléctrico.

2.3.1 La alternativa de las pequeñas Centrales Hidroeléctricas

Las centrales hidroeléctricas con potencia menor de 20 megavatios se denominan Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH). Este tipo de unidades de generación constituyen una alternativa interesante para el sector eléctrico de nuestro país dado que, de acuerdo con la regulación vigente en Colombia, no pagan prima de respaldo por potencia y pueden colocar libremente su energía en el sistema eléctrico interconectado nacional (SEIN) [IPCC, 2011]. Estas dos ventajas son importantes como se explica a continuación.

El respaldo de potencia es la capacidad de generación de energía que se encuentra disponible para atender la demanda de electricidad en Colombia en casos de fallas de otras unidades, porque no es

necesaria para atender esa demanda en condiciones normales. Cuando se opera una planta generadora que no pertenezca al conjunto de respaldo, su propietario debe pagar una tarifa por cada unidad de energía que produzca. El dinero captado por este concepto se transfiere a las centrales de respaldo. Es poco probable que las pequeñas centrales califiquen para ser centrales de respaldo y, por tanto, deben pagar esa tarifa, excepto si su capacidad es menor a 20 megavatios [CREG, 1995].

3. IMPACTOS DE UN PROYECTO HIDROELÉCTRICO SOBRE EL CAPITAL NATURAL

Con la implementación de proyectos hidroeléctricos en una comunidad se afecta su capital natural, y por consiguiente se altera la sostenibilidad del territorio. Los impactos de la construcción de represas sobre los ecosistemas son [World Commision, 2000]:

- *Impactos de primer orden* que involucran las consecuencias físicas, químicas y geomorfológicas de bloquear un río y alterar la distribución natural de las variables bióticas.
- *Los impactos de segundo orden* involucran cambios en la productividad biológica del ecosistema incluyendo los efectos sobre la vegetación de ribera, así como de los ecosistemas aguas abajo
- *Impactos de tercer orden* que involucran la alteración en la distribución de la fauna causada por los impactos de primer y segundo orden.

Los impactos ambientales, sociales y de salubridad generados por la construcción de represas han venido recibiendo una mayor atención por parte de la comunidad internacional en los últimos años [Duque, 2014]. Aunque las represas son muy importantes para el desarrollo de las sociedades, los impactos sobre los ecosistemas, los esquemas sociales, las economías locales y la salud pueden ser muy adversos, especialmente en los países tropicales.

A pesar de sus importantes emisiones de GEI a la atmósfera, la hidroenergía es considerada por muchos una fuente de energía limpia cuando se le compara con la electricidad producida por la quema de combustibles fósiles (carbón, gas, petróleo), que agravan el problema del calentamiento global. Sin embargo, no es fácil comparar el efecto climático de los proyectos hidroeléctricos con los termoeléctricos. Mientras que en las plantas de energía térmica la emisión de GEI se produce de manera constante durante toda la vida útil del proyecto, en las hidroeléctricas las emisiones de CH_4 y CO_2 se concentran en un período de tiempo y decaen antes de terminar la vida útil del embalse [World Commision, 2000].

Dado la afectación que se causa al medio ambiente, se hace necesario valorar los pasivos ambientales con el propósito de cuantificar el valor de la deuda ambiental que se deriva de la materialización del proyecto hidroeléctrico y poder determinar el valor del capital natural para su compensación en la comunidad afectada [UPME, 2002].

El concepto de pasivo siempre hace referencia a la obligación de incurrir en un gasto por una persona como consecuencia de una responsabilidad cuantificable económicamente. Obligación que puede ser contractual, impuesta por una autoridad administrativa, derivada de una decisión judicial o incluso asumida voluntaria y unilateralmente [UPME, 2002]. En otras palabras, el pasivo ambiental hace referencia a la obligación de cubrir el costo de reparar un daño al medio ambiente, impacto negativo o efecto adverso, resultado de una actividad antrópica.

Por su parte, la Ley 143 de 1994, o Ley Eléctrica establece, en los artículos 50 y siguientes, un claro deber a todas las empresas que cumplan una de las actividades de generación, transmisión, o distribución de energía, para que prevengan y controlen los factores de deterioro ambiental. Además, en el artículo 51 se señala una clara obligación a las empresas públicas, privadas o mixtas que emprendan proyectos susceptibles de producir deterioro ambiental, para que eviten, mitiguen, reparen y compensen los efectos negativos sobre el medio natural o social. También exige que todas las actividades susceptibles de producir deterioro ambiental deben obtener la licencia ambiental. En este caso el responsable también está dado por la ley al señalar que son las empresas que desarrollen algunas de las actividades relacionadas con la generación, distribución o transmisión de energía [Congreso de Colombia, 1994]. La evaluación de los costos de los impactos medioambientales como de la protección del capital natural son difíciles de determinar ya que ellos dependen de condiciones geográficas y geológicas bastante específicas [Varun, et al., 2009]. El proceso de valoración monetaria determina que el valor económico total corresponda a la suma del *valor de uso* y del *valor de no uso*. El valor de uso incluye los valores de uso directo, indirecto y opción, mientras que el valor de no uso engloba un conjunto de valores que pueden ser denominados de existencia o intrínseco [Gudynas, 2000]. En ambos casos, se hace indispensable la identificación de los bienes y servicios ambientales que hacen parte del entorno a modificar, explotar o transformar.

Los mecanismos de compensación o pago por servicios ambientales (PSA) son parte de un nuevo enfoque de conservación, que reconoce explícitamente la necesidad de crear un vínculo entre los propietarios de los ecosistemas naturales y los usuarios de los servicios que estos generan [Cordero, et al., 2008]

Los servicios ambientales de los ecosistemas son funciones ecológicas que generan beneficios económicos, ecológicos y sociales para la comunidad local, nacional o internacional [Montes del Olmo & Sala, 2007]. Según varios autores [Carraro, et al., 2012; Robertson & Wunder, 2005], los servicios ambientales objeto de compensación que se transan con mayor frecuencia, en escala significativa, son los asociados con los bosques tropicales y el mercado de carbono: conservación de cuencas hidrográficas, belleza paisajística, biodiversidad, captación y fijación de carbono.

A pesar de que existen instrumentos de regulación para la utilización adecuada de los bienes y servicios ambientales, tales como impuestos o pago de derechos de uso para actividades con costos externos, no se cuenta con el apoyo suficiente de las instituciones gubernamentales encargadas de velar por la efectiva funcionalidad de los mismos [Cordero et al., 2008]

La Figura 4 muestra el proceso para la identificación de los pasivos ambientales en el sector eléctrico colombiano, partiendo del origen de los pasivos ambientales y la conexión que existe entre estos, las normas y los estándares, los aspectos administrativos y legales ambientales, el daño ambiental, la responsabilidad legal y las externalidades.

Se debe entonces adoptar un mecanismo de pago por los servicios ambientales afectados con la implementación del proyecto hidroeléctrico. Diversos autores [Cordero et al., 2008; Norverto, 2002; UPME, 2002] proponen que este mecanismo debe comprender cinco fases:

1. Disponer de información biofísica y socioeconómica del área de estudio, que permita identificar claramente el servicio a mantener o recuperar, así como la problemática ambiental socio ambiental, especialmente las relaciones entre la población, los usos del suelo y los impactos positivos y negativos en la generación de bienes y servicios ambientales, que de estos usos se desprenden.
2. Identificar y caracterizar a los propietarios de las áreas a proteger, conservar y/o recuperar (oferta). Así como los usuarios de los servicios ambientales que dichas áreas generan (demanda).
3. Valorar económicamente el servicio ambiental a mantener y/o recuperar.
4. Analizar la factibilidad técnica, legal y financiera del modelo de compensación.
5. Diseñar el mecanismo de compensación

Después de desarrollar cada una de estas fases, se puede llegar a determinar el porcentaje de inversión que se debería entregar a la comunidad con la venta de los bonos de carbono, producto de la explotación económica del proyecto hidroeléctrico. Posteriormente, se recomienda desarrollar un plan de monitoreo para medir los resultados de las actividades de manejo y de inversión en la comunidad y su impacto en el bienestar socioeconómico de la región [Alliance, 2003; Norverto, 2002].

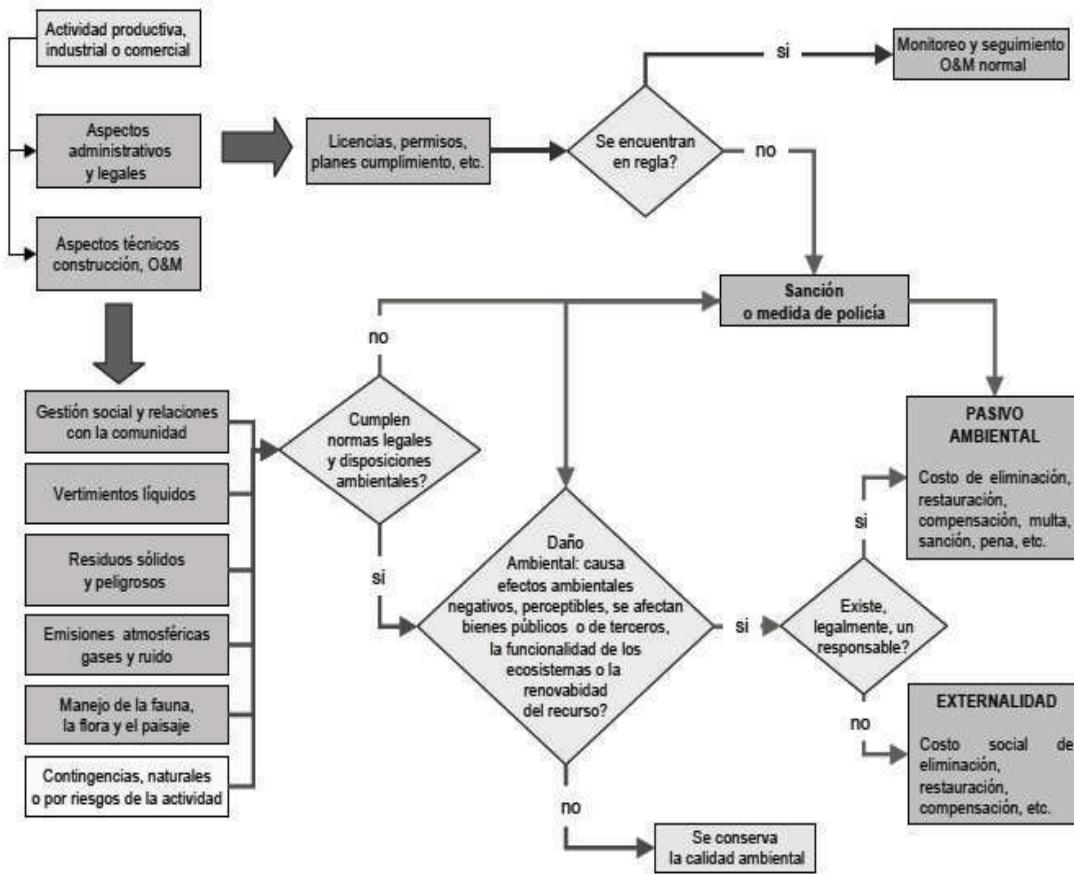


Figura 4: Origen de los pasivos ambientales en el sector eléctrico
 Fuente. [UPME, 2002]

3.1. Metodologías MDL para la valoración económica de emisiones.

Para el caso específico del sector Energía se han desarrollado diferentes tipos de metodologías [UNEP, 2013]. Estas metodologías son, en síntesis, modelos de valoración económica de emisiones que permiten determinar el potencial de reducción de emisiones de un proyecto.

En la Tabla 1 se hace un recuento de las principales metodologías aplicadas a este sector.

4. ESTUDIO DE CASO: PROYECTO HIDROELÉCTRICO DEL RÍO AURES.

A continuación se desarrolla la metodología ACM0002 para el proyecto hidroeléctrico del río Aures. Una versión más detallada de este caso de estudio se puede encontrar en [Duque, 2014].

4.1. Descripción general de la actividad del proyecto

El proyecto hidroeléctrico del río Aures, a desarrollarse en los próximos años, se encuentra localizado al Oriente del departamento de Antioquia, en las inmediaciones de los

municipios de Sonsón y Abejorral, en un caudal de 6 m³/s, a derivarse del río Aures, para uso energético, en el sector definido por la cota 1846 msnm coordenadas X: 857.992,20, Y: 1129.416,26 para la generación de 19,9 MW con una vigencia de concesión de 25 años y con un aprovechamiento forestal de 4.161,02 m² para un volumen comercial aprovechable que asciende a 2.547,09 m² [CORNARE, 2012]

El propósito de este proyecto es generar electricidad adicional para el oriente del departamento de Antioquia y contribuir al desarrollo sostenible de la región y del país, reduciendo las emisiones de CO₂; esta afirmación se ve reflejada en lo siguiente:

1. Esta iniciativa va acorde a una nueva tendencia de fomentar la construcción de pequeñas centrales hidroeléctricas en el país. Estas plantas contribuyen al desarrollo sostenible con pocos recursos en diferentes lugares del país.
2. Las plantas de este tipo contribuyen en la reducción de partículas contaminantes en el país, contrario a lo que ocurre con las plantas termoeléctricas.

No.	TÍTULO	PROYECTOS TÍPICOS	CONDICIONES
AM0019	“Renewable energy projects replacing part of the electricity production of one single fossil fuel fired power plant that stands alone or supplies to a grid, excluding biomass projects”	Construcción de una planta de energía renovable de energía (excluyendo la biomasa).	Centrales con embalse con densidad de potencia mayor a 4 W/m ²
AM0026	“Methodology for zero-emissions grid-connected electricity generation from renewable sources in Chile or in countries with merit order based dispatch grid”	Proyectos de generación de energía con fuentes renovables como hydro, biomasa, geotérmica, solar, eólica y tratamiento de basuras.	Centrales con embalse con densidad de potencia mayor a 4 W/m ³
AM0052	“Increased electricity generation from existing hydropower stations through Decision Support System optimization”	Incrementos en la generación anual de energía a través de la implementación de un sistema DDS conectado a la red.	Se debe optimizar la planta con un sistema de soporte de decisiones DSS
ACM0002	"Grid-connected electricity generation from renewable sources"	Adaptación, sustitución o adición de la capacidad de una planta de energía existente o la construcción y operación de una planta de energía que utiliza fuentes de energía renovables y suministra electricidad a la red. Proyectos a filo de agua.	La metodología no es aplicable para proyectos que reemplacen combustibles fósiles en el lugar del proyecto ni a centrales que operen con biomasa.
AMS-I.D	"Grid connected renewable electricity generation"	Unidades de generación de energía renovables, como la fotovoltaica, hidroeléctrica, de las mareas / olas, eólica, geotérmica y biomasa	Se aplican unos criterios especiales para proyectos hidroeléctricos con embalse

Tabla 1: Metodologías más utilizadas en proyectos hidroeléctricos.

Fuente. (UNEP, 2013)

3. Se puede desarrollar un gran conocimiento y experiencia a nivel nacional en la construcción de este tipo de proyectos, en cuanto al desarrollo de capacidades institucionales nacionales enfocadas a la consolidación de ventajas competitivas para participar en el mercado internacional de carbono.
4. La comunidad cercana al proyecto puede obtener beneficios adicionales por la venta de servicios ambientales generados por el proyecto.

La actividad del proyecto reduce las emisiones de CO₂ en la generación de electricidad mediante el uso de fuentes de energías renovables. La actividad del proyecto sirve para desplazar el combustible que queman las plantas fósiles (una combinación de carbón y gas plantas de energía basadas en el Sistema Interconectado Nacional de Colombia) con la energía limpia proporcionada por hidroelectricidad. La inclusión del proyecto en el Sistema Interconectado redistribuye el envío de todas las plantas de energía que da lugar a una generación de electricidad más eficiente de todo el sistema.

El proyecto apoyará un programa social que incluye: a) La mejora de la salud, el acceso a los servicios de

agua, saneamiento y salud potable, b) la mejora de aquellas infraestructuras c) el acceso a la educación; d) Las actividades de comunicación de apoyo al desarrollo rural, e) Fortalecimiento comunitario y producción sostenible, y f) la conservación de cuencas.

4.2. Título y referencia de la metodología aprobada para la línea base y el monitoreo aplicado a la actividad del proyecto

De acuerdo a la matriz energética de Colombia, el tipo de datos disponibles, y de la propia actividad del MDL, el proyecto propuesto se desarrolló utilizando la metodología de línea de base ACM0002/versión 13.0.0 “Metodología Consolidada para la Generación de Electricidad de Fuentes Renovables Conectadas a la Red” [UNFCCC, 2012]

4.3. Justificación de la metodología seleccionada y de su aplicación a la actividad del proyecto

Debido a la actividad del proyecto, la metodología ACM0002 versión 13.0.0 es aplicable debido a las siguientes razones: i) El proyecto propuesto es de generación eléctrica que utiliza fuente de energía renovable y que suministra la electricidad generada a una

red eléctrica. ii) El proyecto no implica el cambio de combustibles fósiles por energía renovable en el sitio de la actividad del proyecto. iii) Los límites geográficos y el sistema de la red eléctrica del Sistema Interconectado Colombiano pueden ser claramente identificados y la información sobre las características de la red está disponible [Sathaye et al., 2004; Sharma & Shrestha, 2006]. Debido a que el proyecto es una central hidroeléctrica la metodología determina que el proyecto presenta “cero” emisiones de CO₂ [UNEP, 2004; UNFCCC, 2012].

4.4. Descripción de la identificación del escenario de la línea base

El sistema Interconectado de Colombia es un sistema de electricidad hidro-térmico, dominado por las centrales hidroeléctricas (64%) y en menor proporción por plantas térmicas (30,8%) y otras fuentes (5,2%) [UPME, 2013].

La línea base para el proyecto hidroeléctrico del río Aures se define por la electricidad despachada a la red por el proyecto que hubiera sido generada por la operación de plantas conectadas a la red y por la adición de nuevas fuentes de generación, como se refleja en los cálculos del margen combinado (CM).

Por lo tanto, el escenario de la línea base es uno en donde la electricidad que podría ser suministrada por el proyecto a la red, tendría que ser generado por otras plantas actualmente conectadas a la red nacional y por la adición de nuevas plantas al sistema, sobre la base de diferentes tipos de combustibles. Así que, la generación de la red interconectada nacional presenta resultados de emisiones de CO₂ más bajos de los que se producirían sin la implementación del proyecto.

Para este tipo de iniciativas con uso de energías renovables, no se considera la emisión de CO₂ durante la etapa de operación del proyecto [UNFCCC, 2012]. Sin embargo, diversos autores [Abril et al., 2005; Barros & Tiago Filho, 2012; Devault et al., 2009; Purohit, 2008; Timilsina & Shrestha, 2006; van de Vate, 1997] han demostrado que las emisiones generadas en el ciclo del proyecto, en particular en las actividades de implementación del proyecto (construcción, manejo de combustibles, inundación de terrenos) son considerables.

4.5. Cálculo de las reducciones de emisiones previas a la ejecución del proyecto (ex – ante)

Las emisiones del escenario de línea base corresponden a las emisiones de CO₂ asociadas al consumo de combustibles fósiles que hubiese sido utilizado por las centrales de generación de energía que son desplazadas por el proyecto MDL.

Las emisiones de la línea de base se calculan como el producto del factor de emisión (tCO₂/MWh) de la red y la energía neta despachada por la actividad de proyecto.

$$BE_y = EG_{PI,y} \times EF_{grid,CM,y} \quad (1)$$

Donde:

BE_y = Emisiones de la línea base en el año y (t CO₂/yr)

$EG_{PI,y}$ = Cantidad neta de generación de electricidad que se produce y se transmite a la red como resultado de la implementación de la actividad de proyecto MDL en el año y (MWh/yr)

$EF_{grid,CM,y}$ = Factor de emisión de la red, calculado como el promedio ponderado del factor de emisión del Margen de Operación ($EF_{OM,y}$) y el factor de emisión del Margen de Construcción ($EF_{BM,y}$), (t CO₂/MWh)

Se continua con el cálculo del factor de emisión, mediante el siguiente procedimiento:

Paso 1. *Identificación del sistema eléctrico relevante.*

Se utiliza el Sistema Interconectado Nacional.

Paso 2. *Decidir si se incluyen las plantas de generación que no están conectadas a la red (opcional).*

Se decide incluir sólo plantas de energía en el sistema eléctrico del proyecto.

Paso 3. *Seleccionar el método para determinar el margen de operación.*

El cálculo del factor de emisión del margen de operación está basado en el método OM Simple Ajustado. Los datos seleccionados para este cálculo corresponden a un promedio de los últimos tres años de generación, con base en los datos más recientes disponibles.

Paso 4. *Calcular el factor de emisión del margen de operación de acuerdo al método seleccionado.*

El factor de emisión OM Simple Ajustado se calcula como la emisión de CO₂ por unidad de generación de electricidad neta (tCO₂/MWh) de una combinación de plantas low-cost/must-run (este término es ampliamente utilizado en la literatura y se refiere a plantas de bajo costo que deberían entrar al sistema) potencia (k) y otras plantas de energía (m), como se muestra continuación:

$$EF_{OM-Adj,y} = (1 - \gamma_y) \frac{\sum_m EG_{m,y} * EF_{EL,m,y}}{\sum_m EG_{m,y}} + \gamma_y \frac{\sum_k EG_{k,y} * EF_{EL,k,y}}{\sum_k EG_{k,y}} \quad (2)$$

Donde:

$EF_{OM-Adj,y}$ = Factor de emisión del margen de operación simple ajustado en el año y (t CO₂/MWh)

γ_y = Factor que expresa el porcentaje de veces en que las unidades de potencia low-cost/must-run se encuentran en el margen en el año y

$EG_{m,y}$ = Cantidad neta de electricidad generada y entregada a la red por la unidad m en el año y (MWh)

$EG_{k,y}$ = Cantidad neta de electricidad generada y entregada a la red por la unidad k en el año y (MWh)

$EF_{EL,m,y}$ = Factor de emisión de CO₂ por unidad de potencia m en el año y (t CO₂/MWh)

$EF_{EL,k,y}$ = Factor de emisión de CO₂ por unidad de potencia k en el año y (t CO₂/MWh)

m = Todas las unidades conectadas a la red excepto las unidades de potencia low-cost/must-run

k = Todas las unidades de potencia low-cost/must-run conectadas en el año y

Para calcular los factores de emisión de CO₂ $EF_{EL,m,y}$ y $EF_{EL,k,y}$ se aplica la siguiente ecuación:

$$EF_{EL,m,y} = EF_{CO2,i,m,y} * \eta_{m,y} * CONV \quad (3)$$

Donde:

$EF_{CO2,i,m,y}$ = Factor de emisión de CO₂ del tipo de combustible i usado por la planta m en el año y (t CO₂/TJ)

$\eta_{m,y}$ = Eficiencia del combustible de la planta m en el año y (MBTU/MWh)

$CONV$ = Factor de conversión 1 MBTU = 0.001055056 TJ

i = Tipo de combustible usado por la planta m

El conjunto de los factores de emisión de la unidad de potencia n calculado *ex-ante* se deberá revisar al inicio del próximo período de acreditación basado en los datos oficiales y la disposición del público.

En la Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos a

partir de la ecuación 3, para el cálculo de los factores de emisión de CO₂ por unidad de potencia.

Paso 5. Identificar el conjunto de unidades de generación que serán incluidas en el margen de construcción.

La muestra de las plantas de generación más usadas para calcular el margen de construcción corresponden al conjunto de las adiciones de capacidad en el sistema eléctrico que comprende el 20% de la generación (en MWh) y que han sido construidas recientemente [UPME, 2009, 2013]. Con la muestra se determinó el factor de emisión del margen de construcción, obteniendo un resultado para este factor de 0.24422 t CO₂/MWh.

Paso 6. Calcular el factor de emisión del margen de construcción.

El factor de emisión del margen de construcción es el factor de generación promedio ponderado de emisiones (tCO₂/MWh) de todas las unidades de potencia m durante el último año y del que hay datos disponibles de generación de energía, calculado de la siguiente manera:

$$EF_{BM,y} = \frac{\sum_m EG_{m,y} * EF_{EL,m,y}}{\sum_m EG_{m,y}} \quad (4)$$

Donde:

$EF_{BM,y}$ = Factor de emisión del margen de construcción en el año y (t CO₂/MWh)

$EG_{m,y}$ = Cantidad neta de electricidad generada y entregada a la red por la unidad m en el año y (MWh)

$EF_{EL,m,y}$ = Factor de emisión de CO₂ por unidad de potencia m en el año y (t CO₂/MWh)

m = Todas las unidades conectadas a la red excepto las unidades de potencia low-cost/must-run

VARIABLE	2008	2009	2010
Generación Low cost/Must run (kWh)	45.984.245.807	40.677.087.860	40.503.285.282
Emisiones Low cost/Must run (tCO₂)	16.355	33.180	73.224
OM Low cost/Must run (tCO₂/MWh)	0,0003557	0,0008157	0,0018078
Generación No Low cost/Must run (kWh)	8.128.306.238	14.964.392.812	16.068.818.044
Emisiones No Low cost/Must run (tCO₂)	5.326.893	10.951.971	10.338.353
OM No Low cost/Must run	0,6553509	0,7318687	0,6433798

Tabla 2: Factores de emisión por fuente de combustible.

Fuente. Factores de emisión por fuente de combustible.

En la Tabla 3 se presentan los resultados obtenidos para este cálculo.

VARIABLE PARA EL CÁLCULO	RESULTADO
Generación total 2010 kWh	56.897.333.441
20 % Generación total 2010 kWh	11.379.466.688
Generación de las últimas 5 Plantas kWh	205.723.335
20% Generación de las últimas 5 Plantas kWh	11.748.551.458
BM 2010	0,244222184

Tabla 3: Resultados obtenidos para el cálculo del factor de emisión del margen de construcción (BM).

Fuente. [UPME, 2009] Elaboración Propia.

Paso 7. Calcular el factor del margen combinado.

A partir de la ecuación 2 se obtienen los resultados del cálculo del factor de emisión como se presenta a continuación.

VARIABLE	2008	2009	2010
OM No Low cost/Must run	0,6554	0,7319	0,6434
OM Low cost/Must run	0,0004	0,0008	0,0018
Lambda	0,3113	0,0451	0,0203
EF OM Simple ajustado; y	0,4514	0,6989	0,6303
Generación [MWh]	54.112.552	55.641.481	56.572.103
EF OM Simple ajustado 10,09,08 [tCO₂/MWh]	0,59508		
EF_{BM} 10 [tCO₂/MWh]	0,24422		
EF_{CM} [tCO₂/MWh]	0,419650		

Tabla 4: Resultados obtenidos para el cálculo del factor del margen combinado

Fuente. [UPME, 2009] Elaboración Propia.

El valor obtenido para el factor de emisión del margen combinado es 0,41965 tCO₂/MWh. A partir de este dato se pueden estimar la reducción de emisiones del proyecto.

4.6. Resumen de la estimación ex-ante de la reducción de emisiones del proyecto

Para un primer período de acreditación de 7 años, con la implementación del proyecto MDL se obtiene una reducción de emisiones de 385.818 toneladas de CO₂ que permitirían obtener unos ingresos adicionales en el mercado de bonos de carbono, como pago por los servicios ambientales. A continuación se muestra de manera simplificada los datos obtenidos de reducciones estimadas para el proyecto hidroeléctrico.

AÑO	Capacidad Instalada (MW)	Generación anual de electricidad (MWh/y)	Electricidad neta acumulada exportada a la Red (MWh)
2014	19,9	131.340	131.340
2015	19,9	131.340	262.680
2016	19,9	131.340	394.020
2017	19,9	131.340	525.360
2018	19,9	131.340	656.700
2019	19,9	131.340	788.040
2020	19,9	131.340	919.380

Tabla 5: Cálculo de las emisiones reducidas estimadas para el proyecto hidroeléctrico río Aures.

Fuente. Elaboración Propia.

En la Tabla 6 se presenta el resumen de la estimación de la reducción de emisiones para el proyecto hidroeléctrico río Aures, a partir de los datos obtenidos en anteriormente.

AÑO	Estimación de emisiones línea base (tCO ₂ e)	Estimación de emisiones (tCO ₂ e)
2014	55.117	55.117
2015	55.117	55.117
2016	55.117	55.117
2017	55.117	55.117
2018	55.117	55.117
2019	55.117	55.117
2020	55.117	55.117
Total primer período acreditación	385.818	385.818

Tabla 6: Cálculo de las emisiones reducidas estimadas para el proyecto hidroeléctrico río Aures.

Fuente. Elaboración Propia.

4.7. Ingresos esperados por venta de bonos

Existe consenso que con la venta de certificados de reducción de emisiones de GEI incrementa la Tasa Interna de Retorno (TIR) de los proyectos y al mismo tiempo puede facilitar la financiación del mismo dada la alta calidad del flujo de caja generada por la venta de los certificados.

En forma simplificada, los ingresos netos de un proyecto MDL por venta de CERs están dados por la siguiente ecuación:

$$I = V * P - T \quad (5)$$

Donde:

- V = Volúmen de CER (t CO₂)
 P = Precio del mercado (US\$/ t CO₂)
 T = Costos de transacción

Año	Escenario de ingresos según precio del CER		
	USD 3,00	USD 4,50	USD 6,00
2014	\$ 165.350	\$ 248.025	\$ 330.701
2015	\$ 165.350	\$ 248.025	\$ 330.701
2016	\$ 165.350	\$ 248.025	\$ 330.701
2017	\$ 165.350	\$ 248.025	\$ 330.701
2018	\$ 165.350	\$ 248.025	\$ 330.701
2019	\$ 165.350	\$ 248.025	\$ 330.701

Tabla 7: Ingresos proyectados por la venta de CERs del proyecto hidroeléctrico río Aures.

Fuente. Elaboración Propia.

Dadas las características actuales del mercado, cada una de estas variables puede cambiar de forma importante en el tiempo, debido a factores tanto internos como externos al proyecto mismo. De manera que cualquier estimación respecto de los ingresos será, inevitablemente, absolutamente referencial.

Teniendo en cuenta lo anterior, la Tabla 7 muestra los ingresos que se generarían en el proyecto hidroeléctrico del río Aures a partir de tres escenarios, en función del precio de venta de la tonelada de CO₂: 2.5, 3.5 y 5.0 dólares, según el mercado internacional actual proporcionado por las compras de CERs del Banco Mundial. De acuerdo con estos resultados, para un primer período de acreditación del proyecto se generarían ingresos por venta de CERs de USD \$1.157.453,45 en el peor de los escenarios.

4.8. Evaluación del capital natural del proyecto

Teniendo en cuenta lo presentado en la sección 3 (Impactos de un proyecto hidroeléctrico), para determinar los costos del capital natural es necesario determinar las condiciones ambientales de la zona en la cual se llevará a cabo el proyecto, las actividades propias del mismo y la zonificación que permite identificar las áreas sensibles y de manejo especial para cada una de los medios (físico, biótico y social) [Duque, 2014].

Para el desarrollo del proyecto hidroeléctrico del río Aures es necesario la intervención de las quebradas La Florida, Los Linderos, La Esperanza, Chorro Hondo y La Ladera y los paisajes en las veredas Llanadas Abajo, Llanadas Santa Clara, El Salto, Naranjal Abajo, Naranjal Arriba, Magallo Centro y Argentina del municipio de Sonsón, las veredas Aures Arriba, Quebradota Arriba, Quebradota Abajo, Carrizales y La Polea en el municipio de Abejorral.

El proyecto interviene un aprovechamiento forestal único en un volumen total de 4.161,02m³, con utilización de la madera propia de la región para obras civiles de la planta. En el proceso de construcción se generan emisiones atmosféricas en las dos plantas de trituración y en las dos plantas de concretos, por lo cual es necesario el monitoreo de la calidad del aire.

Los impactos ambientales más relevantes del proyecto son: alteración de la dinámica del agua, alteración del paisaje, alteración de la calidad del agua, alteración de la geoforma, pérdida de la cobertura vegetal, pérdida y desplazamientos de poblaciones de fauna, alteración de las comunidades hidrobiológicas y fragmentación de hábitats acuáticos [CORNARE, 2012]

Considerando los impactos mencionados anteriormente y el procedimiento descrito en la Figura 4 se debe determinar el valor económico del capital natural utilizado en el proyecto hidroeléctrico. En este caso, se debe determinar qué porcentaje de los ingresos generados por la venta de bonos de carbono del proyecto se debe destinar como fuente de restauración del capital natural afectado por el proyecto.

Como en el alcance de este trabajo no está el cálculo del valor de los pasivos ambientales se hace la recomendación de destinar el 50% de los recursos obtenidos por la venta de bonos de carbono a los municipios afectados por la construcción del proyecto hidroeléctrico. En experiencias anteriores sólo se ha destinado entre el 20% y 30% de los ingresos generados por la venta de bonos a la comunidad involucrada en el proyecto. Además, se debe tener en cuenta que a la hora de negociar los precios de los CERs con los fondos de inversión de carbono, se pueden lograr mejores precios de venta si el proyecto destina parte de sus recursos en la comunidad.

5. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta el contenido de las secciones anteriores, se puede decir que existen grandes posibilidades para Colombia, y particularmente para Antioquia, de participación en el Mercado del Carbono. Sin embargo, existen interrogantes que deben ser resueltos desde los puntos de vista de análisis económico y ambiental, acerca de la determinación de los aportes que la aplicación del mecanismo de Bonos de Carbono aporta al desarrollo sustentable en el actual escenario económico y ambiental de los proyectos hidroeléctricos en Antioquia. Además, otro ítem a tener en cuenta está constituido por el conocimiento de las condiciones que requieren los proyectos hidroeléctricos existentes en Antioquia y en Colombia para desarrollarse sustentablemente y beneficiarse

de la emisión de bonos de carbono sin impactar negativamente el ambiente.

A la hora de aprobar la construcción de una central hidroeléctrica en Colombia, no se tienen en cuenta los verdaderos costos y daños ambientales sobre el capital natural. Por lo tanto, las ganancias que se obtienen por estos proyectos son sobre el costo ambiental, lo cual no se compensa de manera correcta. La retribución que sea hace a las comunidades por parte de los propietarios de los proyectos hidroeléctricos sólo corresponde al 1% de la inversión forzada y esta retribución no alcanza a compensar los daños ambientales totales. Se debe analizar si el ingreso adicional por la venta de CERs podría contribuir a cubrir este impacto al ambiente.

En caso de que se demuestre la viabilidad de la aplicación de este tipo herramientas en los proyectos de generación hidroeléctrica a nivel departamental y nacional, los excedentes financieros que se presenten pueden ser destinados para la financiación o restauración del capital natural de los proyectos hidroeléctricos, como mecanismo de compensación de los impactos ambientales producidos en el ciclo del proyecto. Además, este mismo análisis puede extenderse hacia implementación de este tipo de mecanismos en otras tecnologías de generación de energía en todo el país, permitiendo el desarrollo del mercado de carbono en Colombia.

Los proyectos hidroeléctricos que busquen contribuir a la sostenibilidad local pueden encontrar en el MDL una manera de complementar fuentes de financiación estables para el desarrollo de los mismos. En este sentido, el proyecto hidroeléctrico del río Aures tiene un potencial de reducción de emisiones de 385.518 toneladas de CO₂ para un primer período de acreditación, lo cual representa generar ingresos estimados de US\$1.1.57.453, US\$ 1.736.180 y US\$ 2.314.906 para los tres escenarios de precio identificados.

6. RECOMENDACIONES

Para el desarrollo de este trabajo no se tuvieron en cuenta aspectos de valoración y costos ambientales de los proyectos hidroeléctricos. Sería importante estudiar un modelo que tuviera en cuenta la verdadera emisión de CO₂ en el ciclo de construcción del proyecto hidroeléctrico, determinar los costos ambientales y compararlos con las emisiones de reducción certificadas por el mismo.

Además, se puede considerar la integración de otros tipos de fuentes de energía eléctrica no convencionales, tales como aerogeneradores, sistemas fotovoltaicos, entre otros, de manera que se pueda tener una medida del impacto de este tipo de fuentes en el sistema eléctrico colombiano y su aplicación como proyectos aprobados como Mecanismo de Desarrollo Limpio.

REFERENCIAS

Abril, G., Guérin, F., Richard, S., Delmas, R., Galy-Lacaux, C., Gosse, P., ... Matvienko, B. (2005). Carbon dioxide and methane emissions and the carbon budget of a 10-year old tropical reservoir (Petit Saut, French Guiana). *Global Biogeochemical Cycles*, 19(4), n/a–n/a. doi:10.1029/2005GB002457

Alliance, C. F. (2003). Conservation finance guide. IUCN, Gland, Switzerland.

Aragón, H. (2008). El Mercado del Carbono: construcción institucional, funcionamiento y perspectivas. (p. 85).

Barros, R. M., & Tiago Filho, G. L. (2012). Small hydropower and carbon credits revenue for an SHP project in national isolated and interconnected systems in Brazil. *Renewable Energy*, 48(0), 27-34. doi:10.1016/j.renene.2012.04.050

BIRD. (2011). Potencial Hidroeléctrico de Antioquia. Inventario, perspectivas y estrategias (p. 112). Banco de Iniciativas Regionales para el Desarrollo de Antioquia. Medellín:

Carraro, C., Favero, A., & Massetti, E. (2012). «Investments and public finance in a green, low carbon, economy». *Green Perspectives*, 34, Supplement 1(0), S15-S28. doi:10.1016/j.eneco.2012.08.036

Congreso de Colombia. (1994). Ley de servicios públicos y ley eléctrica: leyes 142 y 143 del 11 de julio de 1994. Aieun.

Cordero, D., Moreno, A., & Kosmus, M. (2008). Manual para el desarrollo de mecanismos de pago/compensación por servicios ambientales. GTZ/Inwent, Lima.

CORNARE. Resolución 112 5677 por medio de la cual se otorga Licencia Ambiental (2012).

CREG. (1995). Resolución de 1995. Por la cual se establece el Código de Redes, como parte del Reglamento de Operación del Sistema Interconectado Nacional (SIN).

Devault, D. A., Gérino, M., Laplanche, C., Julien, F., Winterton, P., Merlina, G., ... Pinelli, E. (2009). Herbicide accumulation and evolution in reservoir sediments. *Science of The Total Environment*, 407(8), 2659-2665. doi:10.1016/j.scitotenv.2008.12.064

Devault, D. A., Merlina, G., Lim, P., Probst, J.-L., & Pinelli, E. (2007). Multi-residues analysis of pre-emergence herbicides in fluvial sediments: application to the mid-Garonne River. *J. Environ. Monit.*, 9(9), 1009-1017. doi:10.1039/B708454B

Duque, E. (2014, mayo). Sistemas de bono de carbono como fuente de restauración del capital natural en proyectos hidroeléctricos. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Recuperado a partir de <http://www.bdigital.unal.edu.co/20391/>

E. Lokey. (2009). *Renewable Energy Project Development Under the Clean Development Mechanism (Sustainable Future.)*. London: Earthscan.

Eguren, L. (2004). El mercado de carbono en América Latina y el Caribe: balance y perspectivas (No. 83) (p. 85). Santiago de Chile: CEPAL.

Forest Trends Association. (2013, noviembre). Ecosystem Marketplace. Recuperado 1 de noviembre de 2013, a partir de www.ecosystemmarketplace.com

Gudynas, E. (2000). Los límites de la sustentabilidad débil, y el tránsito desde el capital natural al patrimonio ecológico. *Educación, Participación y Ambiente*, 11, 7-11.

International Energy Agency. (2013, mayo 20). Latin America: Statistics. Recuperado a partir de http://www.iea.org/stats/regionresults.asp?COUNTRY_

- CODE=21&Submit=Submit
- IPCC. (2011). Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. (O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, ... C. von Stechow, Eds.). United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Martins, D. E. C., Seiffert, M. E. B., & Dziedzic, M. (2013). The importance of clean development mechanism for small hydro power plants. *Renewable Energy*, 60(0), 643-647. doi:10.1016/j.renene.2013.06.021
- Mol, A. P. J. (2012). Carbon flows, financial markets and climate change mitigation. *Environmental Development*, 1(1), 10-24. doi:10.1016/j.envdev.2011.12.003
- Montes del Olmo, C., & Sala, O. (2007). La Evaluación de los Ecosistemas del Milenio: las relaciones entre el funcionamiento de los ecosistemas y el bienestar humano. *Ecosistemas*, Vol. 16, n. 3 (sept.-dic. 2007); pp. 137-147.
- Murtishaw, S., Sathaye, J., Galitsky, C., & Dorion, K. (2006). Methodological and Practical Considerations for Developing Multiproject Baselines for Electric Power and Cement Industry Projects in Central America. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11(3), 645-665. doi:10.1007/s11027-006-4963-x
- Norverto, C. (2002). Metodologías para el análisis costobeneficio de usos del suelo y fijación de carbono en sistemas forestales para el mecanismo de desarrollo limpio. SAGPyA/BIRF.
- PNUMA, & UNFCCC. (2002). Para comprender el Cambio Climático: Guía Elemental de la Convención Marco de las Naciones Unidas y el Protocolo de Kioto. Denmark. Recuperado a partir de www.cd4cdm.org
- Purohit, P. (2008). Small hydro power projects under clean development mechanism in India: A preliminary assessment. *Energy Policy*, 36(6), 2000-2015. doi:10.1016/j.enpol.2008.02.008
- Robertson, N., & Wunder, S. (2005). Huellas Frescas en el Bosque Evaluación de Iniciativas Incipientes de Pagos por Servicios Ambientales en Bolivia. Editado por Center for International Forestry Research (CIFOR).
- Sathaye, J., Murtishaw, S., Price, L., Lefranc, M., Roy, J., Winkler, H., & Spalding-Fecher, R. (2004). Multiproject baselines for evaluation of electric power projects. *Energy Policy*, 32(11), 1303-1317. doi:10.1016/S0301-4215(03)00098-3
- Sharma, S., & Shrestha, R. M. (2006). Baseline for electricity sector CDM projects: Simplifying estimation of operating margin emission factor. *Energy Policy*, 34(18), 4093-4102. doi:10.1016/j.enpol.2005.09.023
- Tanwar, N. (2007). Clean development mechanism and off-grid small-scale hydropower projects: Evaluation of additionality. *Energy Policy*, 35(1), 714-721. doi:10.1016/j.enpol.2006.01.016
- Timilsina, G. R., & Shrestha, R. M. (2006). General equilibrium effects of a supply side GHG mitigation option under the Clean Development Mechanism. *Journal of Environmental Management*, 80(4), 327-341. doi:10.1016/j.jenvman.2005.10.013
- UNEP. (2004). CDM Information and guidebook (Second.). Denmark. Recuperado a partir de www.cd4cdm.org
- UNEP. (2013). CDM Methodology BOOKLET (Fifth.). Germany. Recuperado a partir de <<https://cdm.unfccc.int/methodologies/>>
- UNFCCC. (2012, mayo 11). ACM0002: "Consolidated baseline methodology for grid-connected electricity generation from renewable sources" V 13.0.0.
- UNFCCC. (2013, octubre). United Nations: Framework Convention on Climate Change. Recuperado 1 de noviembre de 2013, a partir de <http://unfccc.int/2860.php>
- UPME. (2002). Metodología para la valorización de Pasivos Ambientales en el Sector Eléctrico (p. 75). Unidad de Planeación Minero Energética.
- UPME. (2009). Plan de Expansión de Referencia Generación – Transmisión 2010-2024 (p. 118). Unidad de Planeación Minero Energética.
- UPME. (2013, julio 31). Registro de Proyectos de Generación. Recuperado a partir de http://www.siel.gov.co/siel/documentos/documentacion/Generacion/PROYECTOS_2013_JUL.pdf
- Van de Vate, J. F. (1997). Comparison of energy sources in terms of their full energy chain emission factors of greenhouse gases. *Energy Policy*, 25(1), 1-6. doi:10.1016/S0301-4215(96)00111-5
- Van Vuuren, D., Fengqi, Z., Vries, B. de, Kejun, J., Graveland, C., & Yun, L. (2003). Energy and emission scenarios for China in the 21st century—exploration of baseline development and mitigation options. *Energy Policy*, 31(4), 369-387. doi:10.1016/S0301-4215(02)00070-8
- Varun, Bhat, I. K., & Prakash, R. (2009). LCA of renewable energy for electricity generation systems—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(5), 1067-1073. doi:10.1016/j.rser.2008.08.004
- Vitousek, P. M. (1992). Global environmental change an introduction. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 23, 1-14.
- World Bank Institute. (2009). State and Trends of The Carbon Market 2009.
- World Bank Institute. (2012). State and Trends of The Carbon Market 2012. (p. 138). Washington.
- World Commision. (2000). Represas y Desarrollo: Un Nuevo Marco para la Toma de Decisiones (Una síntesis) (p. 46).

Caracterización de la gestión energética en una empresa manufacturera de Manizales

Analysis of Energy Management in a Manufacturing Company From Metalworking in Manizales

Sara Restrepo^{a*}, Julio César Mesa^a, Olga Lucía Ocampo^a, Luis Perdomo^a.

RESUMEN

La gestión de la energía es una estrategia de control aplicada en las organizaciones que permite obtener una mayor eficiencia en el uso de energéticos. La NTC ISO 50001:2011 facilita a las organizaciones la implementación de un Sistema de Gestión Integral de la Energía - SGIE. Este trabajo presenta la caracterización de la gestión energética de una empresa manufacturera del sector metalmecánico de Manizales, a partir de un diagnóstico de implementación de la NTC ISO 50001. Se evaluó el grado de implementación de la norma en la organización. En el aspecto de planificación energética se diseñó un instrumento teniendo en cuenta la herramienta de caracterización propuesta por (UPME, 2008). El instrumento contempló datos sobre producción, consumo de energéticos, equipos principales y su operación. De esta manera, se estableció la línea base y los indicadores de desempeño energético que fueron presentados a la empresa como herramienta inicial para el SGIE. La empresa evaluada presentó algunos requisitos existentes en los aspectos: implementación y operación, y verificación. Los resultados en requisitos generales, política energética y revisión por parte de la dirección son totalmente inexistentes.

PALABRAS CLAVE

Caracterización energética; desempeño energético; indicadores de desempeño energético; gestión de la energía.

ABSTRACT

Energy management is a control strategy applied in organizations which allows an efficient use of energy. The NTC ISO 50001: 2011 provides to organizations the implementation of an Energy Integrated Management System - EIMS. This work presents the review of energy management in a manufacturing company in the metalworking sector from Manizales, based on the NTC ISO 50001. The degree of implementation of the standard in the organization was evaluated. The aspect of energy planning considered a designed instrument taking into account the energy review tool given by (UPME, 2008). The instrument looked on production, energy consumption, main equipment and its operation. Thus, the baseline and performance indicators were established and presented to the company as an initial tools for the EIMS. The company showed some standard requirements in aspects: implementation and operation, and verification. Results in general requirements, energy policy and review by managers are totally absent.

KEYWORDS

Energy review; energy performance; energy performance indicators; energy management.

Energética 44, diciembre (2014), pp.33-39

ISSN 0120-9833 (impreso)
ISSN 2357 - 612X (en línea)
www.revistas.unal.edu.co/energetica
© Derechos Patrimoniales
Universidad Nacional de Colombia



1. INTRODUCCIÓN

En el mundo actual, el uso de la energía presenta grandes retos, como lo son la competitividad y el cambio climático [Carretero & García, 2012].

La estrategia de competitividad [Porter & Kramer, 2011] establece algunos factores determinantes para incrementar la competitividad en las organizaciones. El uso de la energía es considerado como una oportunidad de crear eficiencia en la utilización de recursos y disminuir el impacto en el ambiente creando valor compartido. La energía debe ser evaluada en la organización considerando el abastecimiento, los canales de distribución y la utilización de la misma. En el ámbito energético, la competitividad se refiere a la disminución de intensidad, con el fin acoplar el consumo energético con el desarrollo económico [Carretero & García, 2012].

El cambio climático alude al fenómeno representado por el incremento en la generación de gases de efecto invernadero producto de la quema de combustibles fósiles, los cuales alcanzaron valores record de 385 ppm de CO₂ en el año 2010, con efectos en el incremento de la temperatura de la tierra en 0.95°C [International Energy Agency, 2011]; efectos que agudizan la preocupación por una adecuada gestión energética. De acuerdo con las segunda comunicación Nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático [IDEAM, 2010], en Colombia el sector energético y los procesos industriales son responsables del 36.65% y del 5.10%, respectivamente de las emisiones nacionales de GEI.

En la matriz energética colombiana, las fuentes de energía renovables representaron el 25% de la oferta para el año 2011 por encima del promedio internacional, y el sector industrial es responsable del 30% del consumo energético total [OECD, 2014].

La ley 697 de 2001 [Congreso de Colombia, 2001] declara el uso racional y eficiente de la energía (URE) como un asunto público, de interés social y fundamental para asegurar un abastecimiento energético pleno y oportuno, apuntando a la competitividad de la economía colombiana. El Programa de Energía Limpia para Colombia – CCEP [USAID, 2012] busca aumentar el acceso a fuentes de energías renovables y mejorar las prácticas de eficiencia energética en Colombia a través de proyectos de desarrollo y asistencia técnica, con el fin de estimular la inversión en fuentes de energía renovable y eficiencia energética.

Según la Resolución 186 del 2012 [MADS, 2012], las metas de ahorro y eficiencia energética del sector industrial son del 3,43% en energía eléctrica para

el año 2015 y 0.25% en otros energéticos; mientras que para el sector transporte se tiene una meta de reducción de 0.33% en otros energéticos. Por otra parte esta resolución obliga a incluir fuentes no convencionales de energía en el Sistema Interconectado Nacional y en las zonas no interconectadas con las siguientes metas: 1) SIN: 2015 3.5%, 2020 6.5% 2) ZNI: 2015 20%, 2020 30%. La diversidad de recursos con los que cuenta Colombia le permite satisfacer las necesidades de energía eléctrica, térmica y producción de frío.

La ley 1715 de 2014 [Congreso de Colombia, 2014] promueve el uso de las fuentes no convencionales de energía, enfocada principalmente a fuentes renovables para contribuir al desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de GEI y la seguridad en el abastecimiento de la energía. La ley 1715 establece el marco legal para el aprovechamiento de fuentes no convencionales de energía y el fomento de la inversión.

La gestión de la energía se considera como una estrategia de control aplicada en las organizaciones, que permite disminuir las pérdidas y obtener una mayor eficiencia en los sistemas que demanden cualquier tipo de energía [ICONTEC, 2011]. La aplicación de la gestión energética es una oportunidad de disminuir consumos energéticos, generar ahorros económicos y aumentar la competitividad de las organizaciones [UPME, 2008].

En los últimos años, la situación energética requería una herramienta útil y eficiente para facilitar la gestión de la energía en las organizaciones, permitiendo mejorar el rendimiento y aumentar la competitividad [Carretero & García, 2012]. La NTC ISO 50001 es propuesta en el año 2011 como la herramienta para establecer, implementar, mantener y mejorar un sistema de gestión de la energía [ICONTEC, 2011].

El desempeño energético se define como los resultados medibles de una organización relacionados con el uso, eficiencia y consumo de la energía [Carretero & García, 2012], la Figura 1 presenta el concepto de desempeño energético. El concepto también abarca los indicadores de desempeño energético – IDEs, que surgen de la necesidad de establecer medidas y tratamiento de datos relacionados con la energía [AENOR, 2011].

La NTC ISO 50001:2011 pretende integrar la gestión de la energía como una práctica habitual en la organización; se basa en el ciclo de mejora continua: PHVA, Planificar, Hacer, Verificar, Actuar [ICONTEC, 2011]. La fase de Planificar comprende la revisión energética y la implementación de línea base, IDEs, metas y objetivos energéticos. Por otra parte, Hacer contempla la ejecución de los planes de acción. La Verificación es la fase donde se realiza el seguimiento y medición de los procesos. Finalmente, Actuar se refiere a la toma de decisiones informadas para mejorar el desempeño energético [ICONTEC, 2011].

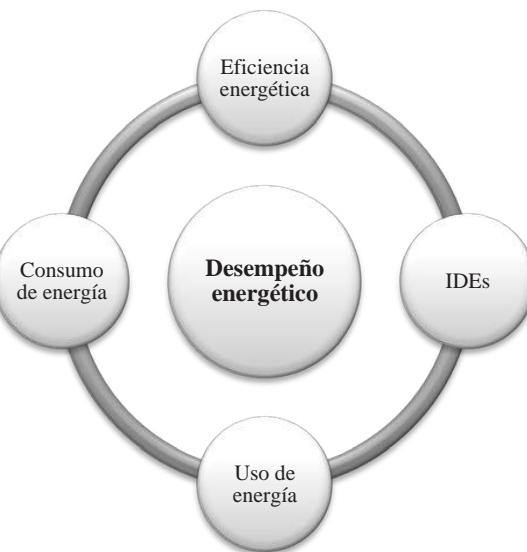


Figura 1: Concepto Desempeño Energético
Fuente. Adaptado [Carretero & García, 2012]

Los estudios realizados por [Campos, 2004] han demostrado baja eficiencia energética en los sectores industriales colombianos. La inversión en estos aspectos es reducida por el desconocimiento en el alcance de los proyectos y los estímulos limitados a la inversión. Por otra parte, el mercado energético del país se encuentra en la construcción de políticas que soporten y den cimientos a las inversiones de proyectos de uso racional de energía [Quispe, et al., 2011] y los lineamientos internacionales en especial, la norma ISO es relativamente reciente.

El [DNP, 2007] propone que el sector manufacturero requiere mejorar su productividad y competitividad en el marco del desarrollo sostenible. La implementación de los sistemas de gestión energética permitiría la reducción de costos en el proceso con disminución del impacto ambiental.

En este trabajo se presenta la caracterización de la gestión energética en una empresa del sector metalmecánico del departamento de Caldas. El estudio consistió en la revisión del grado de implementación de los requisitos del sistema de gestión de la energía propuesto en la NTC ISO 50001:2011.

2. METODOLOGÍA

La investigación es de tipo descriptivo, aplicada, y comprende información de tipo cuantitativo y cualitativo. La caracterización de la gestión energética fue realizada en una empresa perteneciente al sector metalmecánico de la ciudad de Manizales; de tamaño mediano según la clasificación industrial para Colombia [Congreso de la República de Colombia, 2004].

La caracterización se realizó en el marco de la norma ISO 50001:2011, donde se evaluaron los requisitos de implementación de un Sistema de Gestión de la Energía. Se realizó una evaluación preliminar que consideró los sistemas de Gestión implementados

en la empresa: Sistema de Gestión de la Calidad NTC-ISO 9001, Sistema de Gestión Ambiental NTC-ISO 14001 y Sistema de Gestión en Seguridad y Salud Ocupacional NTC-OHSAS 18001.

La caracterización energética comprendió todos los aspectos de los requisitos de implementación de la NTC ISO 50001:2011:

1. Requisitos generales
2. Responsabilidad de la dirección
3. Política Energética
4. Planificación Energética
5. Implementación y Operación
6. Verificación
7. Revisión por la dirección

Se establecieron criterios de evaluación (Ver Tabla 1) para establecer el nivel de implementación de la norma en la organización.

Descripción	Puntaje
No Aplica: La descripción no es aplicable a la organización. (Omite la pregunta en calificación)	
Inexistente: No existe actualmente en la organización	0
Establecido: La manera de realizarlo ha sido definida por la organización, pero no está documentado	1
Documentado: Escrito en cualquier medio o formato	2
Implementado: Se realiza de acuerdo a lo escrito y se han hecho mejoras	3

Tabla 1: Criterios de evaluación en la implementación de la NTC ISO 50001:2011

Fuente. Adaptado: [ICONTEC, 2005]

Los aspectos contemplados se evaluaron mediante una herramienta de diagnóstico de implementación de la norma, donde se preguntó a la empresa por cada uno de los requisitos necesarios para la implementación del sistema de gestión.

2.1. Requisitos generales

La sección de requisitos generales hace referencia a la existencia de un sistema de gestión energética y la consideración de los lineamientos propuestos por la NTC ISO 50001:2011. En los requisitos generales se pregunta si la organización establece, documenta, implementa, mantiene y mejora un Sistema de Gestión Energética.

2.2. Responsabilidad de la dirección

La responsabilidad de la dirección evalúa si la empresa establece, implementa y mantiene una política energética.

2.3. Política energética

El aspecto de política energética se refiere a la existencia de un plan y sus respectivos programas que regule la gestión de la energía.

2.4. Planificación energética

La planificación energética consideró: generalidades, requisitos, revisión energética, línea base, indicadores de desempeño energético y objetivos.

Las generalidades y los requisitos permitieron identificar el estado de la planificación energética desde el ciclo PHVA y establecer que ciclo del proceso se encuentra aplicado dentro de la organización.

Con el fin de implementar los ciclos Hacer-Verificar-Actuar se caracterizó la gestión energética de la empresa mediante un instrumento metodológico aplicado en forma de encuesta al personal de la empresa perteneciente a producción y mantenimiento. El instrumento tomó como base la información propuesta en las encuestas para implementar el sistema de gestión integral de la energía de [UPME, 2008].

El instrumento contempló información general de la empresa, sus líneas de proceso, los equipos que reportan el mayor consumo energético, operación de los equipos, producción total mensual de la empresa y consumo de energéticos durante el año inmediatamente anterior. También se incluyeron listas de chequeo de operación según el tipo de equipo [Aire comprimido, compresores de refrigerante, accionamientos, chillers, torres de refrigeración, calderas, cuartos fríos, refrigeración, iluminación] donde se define la adecuada operación de los equipos según las prácticas propuestas por [UPME, 2008].

La información recolectada mediante la aplicación del instrumento permitió construir la línea base con el fin de obtener una medición regular de las variables del proceso. La línea base tiene como objetivo identificar las eficiencias en los consumos. De esta manera, se estableció el gráfico de consumo vs producción (E vs P) que relaciona la energía usada y la producción en un mismo periodo de tiempo; el gráfico determina cuando la variación de consumos energéticos se debe a variaciones de la producción [UPME, 2008]. El estudio contempló en el gráfico E vs P por cada energético empleado en la planta de producción.

Los consumos energéticos en el periodo de un año permitieron establecer los Indicadores de Desempeño

Energético IDEs. El comportamiento de los indicadores fue analizado mediante control de calidad para determinar la variabilidad del proceso.

La línea base e indicadores de desempeño energético establecidos, serán el insumo para la organización en la fase de definición de objetivos energéticos, metas energéticas y planes de acción para la gestión de la energía.

2.5. Implementación y operación

El aspecto de implementación y operación de la norma evaluó la competencia que tiene la organización respecto a la operación de un Sistema de Gestión Integral de la Energía. Verificó la comunicación interna de desempeño energético, control de documentos y control operacional.

El control operacional evaluó las actividades de operación de los equipos clasificados en los grupos mencionados anteriormente. Se verificó si en la empresa se realizan prácticas adecuadas en los equipos; la Tabla 2 presenta un ejemplo de prácticas verificadas en el control operacional según el tipo de equipo.

Tipo de equipo	Práctica
Aire Comprimido	¿Realiza pruebas para detectar si el sistema de distribución de aire comprimido tiene fugas?
Accionamientos	¿Verifica con regularidad la tensión de las correas?
Calderas	¿Se encuentran aisladas las tuberías de retorno de condensados?

Tabla 2: Ejemplo de verificación de operación de equipos.

Fuente. Adaptado: (UPME, 2008)

2.6. Verificación

La verificación de la NTC ISO 50001:2011 evaluó diferentes aspectos presentados a continuación:

- Seguimiento, medición y análisis
- Evaluación del cumplimiento de los requisitos legales y de otros requisitos
- Auditoría interna del sistema de gestión de la energía
- No conformidades, corrección, acción correctiva y acción preventiva
- Control de los registros

2.7. Revisión por la dirección

El último aspecto se enfoca en el proceso “Actuar” del ciclo PHVA. Se preguntó si la información del desempeño energético es revisada por la dirección como insumo para la toma de decisiones informadas.

3. RESULTADOS

3.1 Nivel de implementación de la norma ISO 50001: 2011

La evaluación del nivel de implementación de la norma ISO 50001:2011 se muestra en la Figura 1, donde se presenta el estado actual de la empresa respecto al sistema de gestión energética bajo el cumplimiento de la totalidad de los requisitos del sistema de gestión de la energía.

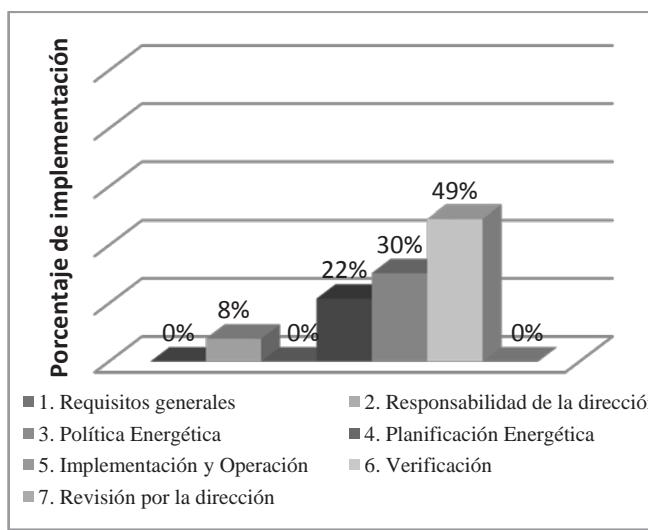


Figura 2: Nivel de implementación de la NTC ISO 50001:2011
Fuente. Elaboración propia

3.2. Requisitos generales

El aspecto de requisitos generales evaluó sí el sistema de gestión energética se encuentra definido y su alcance documentado. Los resultados en la empresa presentaron un sistema de gestión energética inexistente y un concepto de desempeño energético basado en el consumo, que deja de lado el uso eficiente de la energía.

3.3. Responsabilidad de la dirección

La caracterización de la gestión energética por parte de la dirección se divide en dos aspectos principales: alta dirección y representante de la dirección. En la alta dirección la empresa presenta la totalidad de los requisitos inexistentes, donde no conoce la pertinencia de sus indicadores de gestión y tampoco planifica su desempeño energético a largo plazo. Por otra parte, algunos aspectos del representante de la dirección están establecidos porque existe una comunicación del desempeño energético, referido a consumos, hacia la dirección. La evaluación general del aspecto responsabilidad de la dirección arroja una implementación del 8% es decir, inexistente.

Se recomienda a la dirección, asegurar la disponibilidad de recursos necesarios con el fin de implementar el sistema de gestión; los recursos incluyen: personal encargado de la política energética, capacitación para el personal, recursos financieros y tecnológicos.

3.4. Política Energética

La política energética consideró las intenciones de una organización relacionadas con su desempeño energético. Los resultados de la caracterización en la empresa presentaron un estado inexistente. Se detectó que la organización carece de una planificación energética establecida para dar paso a la definición de una política energética.

3.5. Planificación Energética

La planificación energética involucró diferentes aspectos: generalidades, requisitos legales, revisión energética, indicadores de desempeño energético -IDE y objetivos y metas energéticas.

En general, la planificación energética reportó algunos aspectos establecidos, lo que facilita el cumplimiento de requisitos por parte de la ISO 50001: 2011.

Algunos requisitos legales se encuentran establecidos, pero carecen de una implementación completa donde se realice la totalidad del ciclo PHVA.

3.6. Revisión energética y línea base

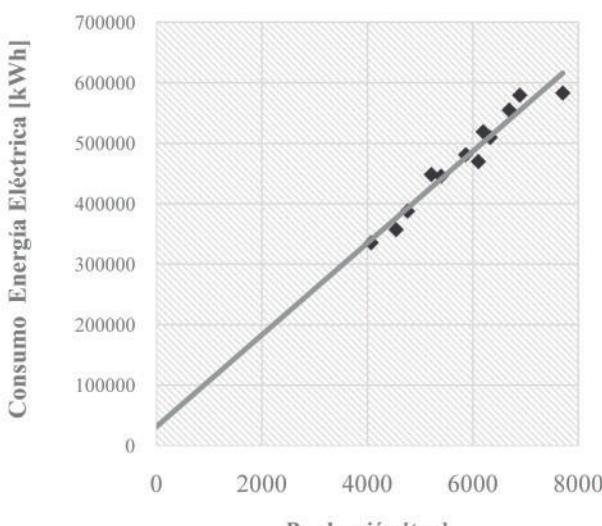
La revisión energética fue realizada en la empresa con el fin de establecer los modelos de documentación necesaria para cumplir con el requisito de planificación energética propuesto por la norma. Se recolectó la información por medio del instrumento de revisión energética para empresas. La información fue obtenida con la participación del jefe de producción, supervisor de producción, coordinador de proyectos y coordinador de mantenimiento. La información contempló datos generales de la empresa, la operación de los principales equipos, producción total mensual y consumo de energéticos durante el año 2013. Para establecer los indicadores de gestión de la energía se construyó la línea base de la empresa.

El objetivo de la línea base es determinar en qué medida la variación de los consumos energéticos se debe a variaciones de la producción. La línea base consideró todos los energéticos usados en la planta de producción: gas natural, ACPM, energía eléctrica, carbón. Para establecer el modelo se realizó la prueba de normalidad a todas las variables como se presenta en la Tabla 3 el tamaño de la muestra es igual a doce, correspondientes a los meses del año 2013.

	Shapiro – Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
Energía Eléctrica [kWh]	0,951	12	0,645
ACPM [m ³]	0,817	12	0,015
Gas Natural [m ³]	0,917	12	0,264
Carbón [kg]	0,854	12	0,041
Agua [m ³]	0,819	12	0,016
Producción [ton]	0,985	12	0,997

Tabla 3: Prueba de normalidad**Fuente.** Elaboración propia

Según los resultados de distribución normal, el modelo pudo ser establecido para gas natural y energía eléctrica. El gas natural no presentó ninguna correlación entre datos. Por otra parte, en energía eléctrica Figura 3 la correlación de los datos corresponde a $R^2=0,949$, correlación excelente.

**Figura 3:** Línea base para Energía Eléctrica
Fuente. Elaboración propia

En el modelo de línea base los energéticos considerados en la empresa deberían presentar una correlación con la producción. Para el caso analizado sólo el consumo de energía eléctrica presenta una correlación excelente, por tal motivo se recomienda una verificación de consumos de otros energéticos (gas natural, ACPM, carbón) y la ampliación del periodo de tiempo considerado.

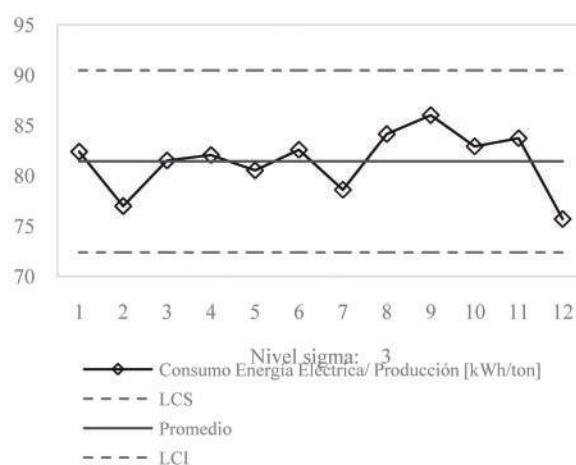
3.7. Indicadores de desempeño energético - IDE

La información de línea base permitió construir los indicadores de desempeño energético presentados en la Tabla 4 para el periodo 2013. Se realizó el control de dichos indicadores con el fin de identificar si el proceso se encuentra bajo control estadístico y su índice de estabilidad.

Indicador de Gestión Energética	Unidades
Consumo Energía Eléctrica / Producción	kWh/ton
Consumo Gas Natural / Producción	m ³ /ton
Consumo ACPM / Producción	m ³ /ton
Consumo Carbón / Producción	kg/ton

Tabla 4: Indicadores de gestión establecidos en la empresa objeto de análisis**Fuente.** Elaboración propia

Los indicadores reportados se encuentran dentro de los límites establecidos. La Figura 3 presenta el control estadístico para el indicador Consumo Energía Eléctrica / Producción, donde no se observa patrón especial, por tanto el proceso está en control estadístico en cuanto a variabilidad. El índice de estabilidad arroja un proceso estable.

**Figura 4:** Gráfico de control Energía Eléctrica/Producción
Fuente. Elaboración propia

3.8. Implementación y operación

El aspecto de implementación y operación del sistema de gestión de la energía reporta un 30% de implementación. Los aspectos: competencia, formación, comunicación, requisitos de la documentación y control operacional arrojan un resultado inexistente. Por otra parte, el puntaje obtenido se debe a la evaluación del control de documentos, totalmente implementado. La empresa establece, implementa, mantiene, revisa procedimientos.

El control operacional apenas es establecido en la organización y se evaluó la operación de los equipos con el objetivo de implementar un procedimiento adecuado. Se encontró en la planta de producción equipos de aire comprimido, accionamientos y calderas. La operación de dichos equipos fue evaluada según buenas prácticas donde los equipos de aire comprimido presentan en su mayoría prácticas adecuadas, sin embargo tienen un 27% de

acciones que podrían mejorar. Los accionamientos presentan una operación completamente adecuada. Finalmente, se encontró una caldera cuya operación es medianamente adecuada y se requiere una mejora la disposición de condensados y eliminación de pérdidas por tuberías.

3.9. Verificación

La verificación del sistema de gestión obtuvo un 49% de implementación. Verificación, corresponde al aspecto con mejor calificación debido a la auditoría interna que se realiza actualmente en la empresa, donde las no conformidades son tratadas mediante acciones correctivas y preventivas. Además, llevan un control de registros y contemplan un cronograma de auditorías.

3.10. Revisión por la dirección

El aspecto que evalúa la revisión por parte de la dirección se reportó completamente inexistente, donde se requiere una supervisión continua de los IDE con el fin incluir en la toma de decisiones los cambios relacionados con los recursos energéticos.

4. CONCLUSIONES

Se realizó una caracterización energética de la empresa mediante la evaluación del grado de implementación de la NTC ISO 50001:2011. En el aspecto de planificación energética el instrumento reveló que la empresa requiere revisiones específicas en el consumo de gas natural, ACPM y carbón. La caracterización energética permitió establecer la línea base y los IDEs. La línea base para la energía eléctrica reveló una correlación excelente donde el consumo está asociado a la producción en un 94,9%. El control estadístico de indicadores presentó procesos dentro de los límites de control. La empresa objeto de estudio mostró algunos requisitos existentes en los aspectos de implementación y operación, y verificación. Por otra parte los aspectos de requisitos generales, política energética y revisión por parte de la dirección son totalmente inexistentes.

Con aras a la implementación de un Sistema de Gestión Integral de la Energía dentro de la organización se recomienda realizar una caracterización energética considerando un periodo de tiempo más amplio. El SGIE también requiere mayor presencia de la dirección garantizando los recursos humanos, económicos y de capacitación al personal.

REFERENCIAS

- AENOR. (2011). *UNE-EN ISO 50001:2011. Sistemas de gestión de la energía. Requisitos con orientación para su uso.* Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación.
- Campos, J. (2004). Caracterización energética de empresas industriales. *Memorias I Congreso Internacional sobre Uso Racional y Eficiente de la Energía*, (págs. 314-318). Cali.
- Carretero, A., & García, J. M. (2012). *Gestión de la eficiencia energética: cálculo del consumo, indicadores y mejora.* AENOR.
- Congreso de Colombia. (2001). *Ley 697*. Bogotá.
- Congreso de Colombia. (2014). *Ley 1715 del 13 de Mayo de 2014*.

Bogotá: Gobierno Nacional.

Congreso de la República de Colombia. (2004). *Ley 905 del 2 de agosto de 2004.* Bogotá.

DANE. (2013). *Encuesta Anual Manufacturera - EAM 2011.* Bogotá: Departamento Administrativo Nacional de Estadística.

DNP. (2007). *Agenda Interna para la productividad y la competitividad - Caldas.* Bogotá: Departamento Nacional de Planeación.

ICONTEC. (2005). *NTC- ISO 9000. Sistemas de Gestión de la Calidad.* Bogotá: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

ICONTEC. (2011). *NTC-ISO 50001. Sistema de gestión de la energía.* Bogotá: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

IDEAM. (2010). *2a Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.* Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

International Energy Agency . (2011). Obtenido de World Energy Outlook: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/English.pdf>

MADS. (2012). *Resolución 186*. Bogotá: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

ODES. (2005). *La PML como estrategia empresarial para fomentar la Competitividad.* Bogotá: Organización para el Desempeño Empresarial Sostenible.

OECD. (2014). *OECD Environmental Performance Reviews.* Colombia: OECD Publishing.

Porter, M., & Kramer, M. (2011). *Harvard Business Review.*

Quispe, E. C., Castrillon, R. P., Campos, J. C., & Urhan, M. (2011). El modelo de Gestión Energética colombiano: Desarrollo, experiencias y resultados de aplicación y perspectivas futuras del desarrollo. *IX Congreso Nacional y IV Internacional de Ciencia y Tecnología del Carbón y Combustibles Alternativos.* Cali: Conicca.

UPME. (2008). *Sistema de Gestión Integral de la Energía. Guía para la implementación*. Bogotá: Unidad de Planeación Minero Energética.

USAID. (2012). *Programa de Energía Limpia para Colombia -CCEP.* Bogotá.

Flujo de potencia óptimo multiobjetivo para el análisis de sistemas de potencia con generación eólica.

Multiobjective Optimal Power Flow for the Analysis of Power Systems with Wind Generation.

Germán Andrés López^{a*}, Edmarcio Antonio Belati^a, Alfeu Joãozinho SguareziFilho^a.

RESUMEN

Recibido: septiembre 29 de 2014
Recibido con revisión: octubre 3 de 2014
Aceptado: octubre 27 de 2014

^{a*}Universidade Federal do ABC (UFABC)
Centro de engenharia, modelagem e
ciências sociais aplicadas - CECS
Rua - Santa Adélia, N°166
Bairro Bangu - Santo André / SP - Brasil
Tel.: +55 (11) 94834-5682
germana_lopez@hotmail.com

Este artículo presenta una metodología de análisis para sistemas de transmisión con la inserción de generadores eólicos, el estudio desarrollado tiene dos fases, en la primera fase, la disponibilidad de potencia activa y reactiva para un parque eólico es calculada en relación con la velocidad del viento, haciendo uso de un polinomio que representa la función de inyección de potencia para el parque eólico en la red; para la segunda fase, se implementa un flujo de potencia óptimo multiobjetivo con el fin de analizar el desempeño del sistema buscando minimizar las pérdidas de potencia activa y optimizar los perfiles de tensión; el problema de FPO fue simulado con la herramienta A Modeling Language for Mathematical Programming, a través del solver KNITRO. Las simulaciones desarrolladas en el sistema estándar IEEE de 30 barras modificado, muestran claramente los beneficios de utilizar el FPO multiobjetivo para encontrar un punto de operación óptimo en este tipo de sistemas.

PALABRAS CLAVE

Flujo de Potencia Óptimo; Generación Eólica; Pérdidas de Potencia; Perfil de tensión; Sistemas de Transmisión de Energía Eléctrica.

ABSTRACT

This paper presents an analysis methodology for transmission systems with the inclusion of wind generators, the study performed consists of two phases, in the first phase, the availability of active and reactive power for a wind park is calculated in relation to the wind speed, by using a polynomial that represents the function of power injection for the wind park in the network; for the second phase, an optimal power flow multiobjective is implemented to analyze the performance of the system seeking to minimize the active power losses and to optimize the voltage profiles; the OPF problem was simulated with A Modeling Language for Mathematical Programming tool, through KNITRO solver. The simulations developed in the IEEE 30 bar standard system, clearly show the benefits of using the multi-objective OPF to find optimal operating point in these types of systems.

KEYWORDS

Optimal Power Flow; Wind Power Generation; Power Losses; Voltage profile; Systems Power Transmission.

1. INTRODUCCIÓN

Los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) vienen operando cada vez más cerca de los límites máximos de carga y esa situación permanecerá inalterada en los próximos años. La generación de electricidad a partir de energía eólica experimenta un gran aumento, pasando del 1% de la generación mundial de electricidad en 2009 a 13% en el 2035 [IEO, 2011]; por dicha razón la búsqueda de alternativas energéticas con el uso de fuentes renovables y la optimización de los recursos viene aumentando.

Una de las formas de energía renovable más importantes es la energía eólica que es la energía cinética contenida en las masas de aire en movimiento. Su aprovechamiento ocurre por medio de la conversión de energía cinética de traslación en energía cinética de rotación con el empleo de turbinas eólicas (aerogeneradores). La energía producida por el viento es considerada técnicamente aprovechable cuando su densidad es mayor o igual a 500 W/m², a una altura de 50m, lo que requiere una velocidad mínima del viento por vuelta de 7 m/s [ANEEL, 2013]. Una máquina de generación eólica moderna típica tiene una capacidad de producir entre 1 y 3 MW de potencia activa, empleando una turbina eólica con eje horizontal [Heier, 2006]. Diversas de esas maquinas operan de forma conjunto constituyendo un parque eólico cuya capacidad de generación puede alcanzar más de 100 MW.

Inicialmente los aerogeneradores fueron proyectados para operar con factor de potencia unitario. Sin embargo algunos estudios [Xu & Cartwright, 2006; Sguarezi Filho & de liveira Filho, 2011] presentan técnicas de control de potencia activa y reactiva para el Generador de Inducción de Rotor Bobinado (GIRB), comúnmente conocido en la lengua inglesa como DFIG (*Doubly Fed Induction Generator*) que posibilita la operación con factor de potencia diferente de uno.

El funcionamiento de los SEP que posean generación eólica, con un alto grado de calidad, seguridad y confiabilidad, en conjunto con una operación económica, debe ser prioritario para todos los agentes que actúan en el mercado energético debido a la creciente inserción de este tipo de tecnologías en las redes convencionales; en este orden de ideas, la reducción de pérdidas de energía en conjunto con la optimización de los perfiles de tensión, ofrece la posibilidad de tener un servicio que cumpla con estas características, al mismo tiempo que la reducción de pérdidas tiene un impacto directo en la economía de los operadores, la optimización de los perfiles de tensión incide directamente en la calidad del servicio ofrecido a los consumidores; por tanto, se hace indispensable el uso de herramientas de análisis para los SEP con el objetivo de auxiliar a los agentes operadores en la toma de decisiones que otorguen beneficios tanto para ellos como para los usuarios.

Una de las herramientas más poderosas para el análisis de los SEP es el Flujo de Potencia Óptimo (FPO) [Baptista et al., 2006]. El problema del FPO busca optimizar una función específica, satisfaciendo restricciones que son regidas por particularidades operacionales y físicas de la red eléctrica. El problema del FPO es un problema cuyos modelos matemáticos utilizados envuelven dificultades como: no linealidad y no convexidad, millares de restricciones, variables discretas y/o enteras, lo que ocasiona un problema de difícil solución, tornándose en un tema interesante para investigadores en todos los niveles académicos.

EL FPO tiene aplicaciones en diversos problemas de análisis y operación de sistemas de potencia, tales como, despacho económico, análisis de sensibilidad de generación y transmisión, análisis de seguridad, planeamiento de la expansión de generación y transmisión, y programación de generación en corto plazo. El FPO en comparación con el Flujo de Carga AC trae muchas ganancias, pues atiende todas las restricciones de la red optimizando una determinada función objetivo.

En este trabajo se presenta una metodología de análisis de SEP considerando aerogeneradores del tipo GIRB con control de potencia activa y reactiva [Belati et al., 2013], los aerogeneradores fueron agrupados formando un parque eólico que fue integrado en el sistema estándar IEEE de 30 barras a través de la barra 8, posteriormente fue modelado un algoritmo de FPO con todas las características del sistema y resuelto con el objetivo de reducir las pérdidas de potencia activa en conjunto con la minimización del desvío de tensión. El algoritmo fue escrito en el lenguaje de programación AMPL [AMPL, 2014] utilizando el solver KNITRO [Knitro, 2014] para obtener la solución.

El trabajo en las siguientes secciones se divide así: la sección 2 describe el modelo de FPO multiobjetivo, la metodología implementada y las herramientas utilizadas en el análisis, en la sección 3 son expuestos los resultados con sus discusiones, y finalmente las conclusiones en la sección 4.

2. FLUJO DE POTENCIA ÓPTIMO MULTIOBJETIVO, METODOLOGÍA.

El problema de FPO puede ser presentado de forma general como sigue en la Ec. (1):

Minimizar $f(x)$ sujeto a:

$$\begin{aligned} g(x) &= 0 \\ h(x) &\leq 0 \\ x_{min} &\leq x \leq x_{max} \end{aligned} \tag{1}$$

Donde:

x es el vector de las variables de estado, $f(x)$ es la función que representa el desempeño del sistema, $g(x)$ es el conjunto de las ecuaciones de flujo de carga y $h(x)$ es el conjunto de los límites de las restricciones funcionales del sistema de potencia.

El vector de las variables de estado x representa las magnitudes de tensión, ángulos de fase y tap's de los transformadores. La función objetivo $f(x)$ puede asumir diferentes formas, por ejemplo, las pérdidas de potencia o el costo de potencia activa despachada por los generadores; en este trabajo se consideran un FPO multiobjetivo, donde se tiene en cuenta la reducción de pérdidas de potencia activa en la transmisión junto con la minimización del desvío de tensión, Ec. (2); las generalidades del modelo son presentadas en las Ec. (2) a (9).

$$f(x) = \sum_{k=1}^{NL} [g_{km} (V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km}) + \alpha (V_k - 1)^2] \quad (2)$$

Las restricciones de igualdad $g(x)$ representan las ecuaciones de balance de potencia activa y reactiva en las barras del sistema, para las barras sin generación eólica se consideran las siguientes ecuaciones (3) y (4).

$$P_k(x) = P_{GK} - P_{LK} = V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \operatorname{sen} \theta_{km}) \quad (3)$$

$$Q_k(x) = Q_{GK} - Q_{LK} + Q_k^{sh} = V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \operatorname{sen} \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (4)$$

Para las barra con generación eólica las restricciones $g(x)$ se representan de la siguiente manera (5) y (6)

$$P_w(x, v) = P_{Gw} - P_{Lw} = V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \operatorname{sen} \theta_{km}) \quad (5)$$

$$Q_w(x, P_w) = Q_{Gw} - Q_{Lw} + Q_k^{sh} = V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \operatorname{sen} \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (6)$$

Donde:

P_k y Q_k son respectivamente la inyección de potencia activa y reactiva en la barras sin generación eólica, P_{GK} y Q_{GK} corresponden a la generación de potencia activa y reactiva para las barras sin generación eólica P_w y Q_w son la inyección de potencia activa y reactiva para la barra con generación eólica P_{Gw} y Q_{Gw} se relacionan con la generación de potencia activa y reactiva para la barra con generación eólica P_{LK} y Q_{LK} son respectivamente la carga activa y reactiva en la barra k , Q_k^{sh} es la inyección de potencia reactiva debido al elemento *shunt* de la barra k , G_{km} es la parte real de los elementos de la matriz de admitancias Y_{BUS} correspondiente a la línea k y columna m , v representa la velocidad del viento.

Las restricciones de desigualdad $h(x)$ representan los límites de inyección de potencia reactiva para las barras sin generación eólica Ecuación (7) y para las barras con generación eólica Ecuación (8), así como los límites en los niveles de tensión Ecuación (9).

$$Q_{GK}^{\min} \leq Q_{GK} \leq Q_{GK}^{\max} \quad (7)$$

$$Q_{Gw}^{\min} \leq Q_{Gw} \leq Q_{Gw}^{\max} \quad (8)$$

$$V_K^{\min} \leq V_k \leq V_K^{\max} \quad (9)$$

Los sobrescritos min y max corresponden a los límites inferior y superior de las variables que deben ser satisfechos en la solución del FPO. Dependiendo del estudio realizado otros objetivos y restricciones pueden hacer parte del modelo de FPO [Baptista et al., 2006].

En este trabajo fue utilizado el lenguaje de programación AMPL y el *solver* KNITRO en la solución del problema. El software AMPL ofrece un ambiente de programación simple para configurar y solucionar problemas de programación matemática, su interface flexible y amigable permite la utilización de diversos *solvers*, que el usuario puede alternar seleccionando las opciones que mejoren el desempeño del programa [AMPL, 2014]. KNITRO es una biblioteca de programas de optimización utilizada para encontrar soluciones tanto para modelos de optimización continua (con y sin restricciones) como modelos de optimización discreta [Knitro, 2014].

Para la solución de problemas de programación no lineal, KNITRO dispone de las siguientes metodologías: Puntos Interiores/Directo, Puntos Interiores/Gradiente Conjugado y la técnica de Conjunto Activo; la solución para el problema planteado toma en cuenta la técnica de Puntos Interiores/Directo [Granville, 1994].

La disponibilidad de potencia activa y reactiva para el parque eólico aplicando el control descrito en [Belati et al., 2013] se presenta en la tabla 1; la potencia reactiva Q para cada velocidad del viento (más de 9 m/s), puede ser ajustada con un factor de potencia de 1.0 hasta 0.95; estos datos de disponibilidad de generación fueron utilizados para encontrar el polinomio que representa la inyección de potencia activa del parque eólico.

2.1. Aproximación de la función de inyección de potencia activa.

Después de conocer la disponibilidad de potencia para el parque conectado en la barra 8 (figura 1A en el apéndice), dentro de la franja de velocidades de viento de 6 [m/s] a 14 [m/s], fue encontrado un polinomio que representa la inyección de potencia activa en función del viento Ecuación (10).

Velocidad [m/s]	P_{GK} [MW]	Q_{GK} [MVar]	S [MVA]	fp
6	16,3	0	16,3	1
7	23,75	0	23,75	1
8	33,85	0	33,85	1
9	64,36	21,33	67,85	0,95
10	80	26,34	84,22	0,95
11	98,55	32,5	103,77	0,95
12	124,24	40,93	130,80	0,95
13	157,32	51,76	165,61	0,95
14	164,64	54,11	173,30	0,95

Tabla 1: Disponibilidad de Potencia activa y reactiva para el Parque eólico con control de potencia.

Fuente. Tomado de ‘Materials and processes for energy: communicating current research and technological developments (A. Méndez-Vilas, Ed. 2013 pp. 525 -535)’

$$P_{GW} = -0.0146591v^6 + 0.82061v^5 - 18.725v^4 + 222.48v^3 - 1447v^2 + 4883v - 6673.3 \quad (10)$$

Donde P_{GW} es la potencia activa generada por el parque eólico y v es la velocidad del viento.

La figura 1 representa la gráfica del polinomio.

La función P_{GW} , Ecuación (10), que constituye la inyección de potencia activa para el parque eólico considerado en el estudio, fue obtenida a través de la herramienta de ajuste de datos (*Basic fitting*) del programa MATLAB; la aproximación de la función puede mejorar en la medida que se disponga de una mayor cantidad de datos.

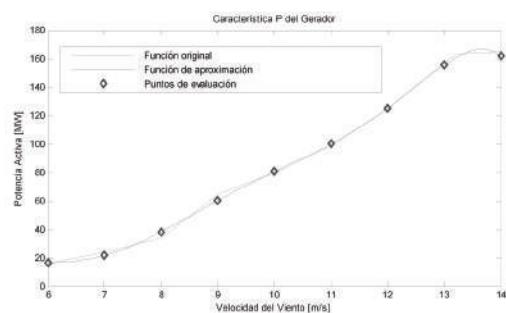


Figura 1: Aproximación de la función de inyección de potencia activa.

Fuente. Elaboración propia.

Inicialmente fue graficada la función original teniendo en cuenta la disponibilidad de potencia activa y reactiva mostrada en la tabla 1; esto se hizo considerando 2 vectores, x y y , que contienen respectivamente las velocidades del viento para el rango de 6 [m/s] hasta 14 [m/s] y sus correspondientes valores de potencia activa.

Una vez obtenida la curva original es hallada la función de aproximación (línea azul en la figura 1) por medio del ajuste de datos; fue escogido un polinomio de grado 6 en razón de que este presenta el porcentaje de error más bajo con relación a las demás aproximaciones que ofrece la herramienta; como se puede apreciar en la figura 1 el desvió en la función de aproximación se encuentran dentro de un rango aceptable, teniendo esto presente, es posible llevar a cabo el análisis de FPO esperando una respuesta confiable en las simulaciones.

Más allá de tener la opción de realizar un estudio para todos los valores posibles del viento dentro del rango establecido, la importancia de obtener la función de inyección de potencia activa del generador, radica en la posibilidad que se tiene de generalizar los estudios, es decir, no se está sujeto al tipo de generador utilizado o del control aplicado en este, así, en cualquier investigación

que se desee realizar, enmarcada en análisis similares al propuesto, solo bastaría con tener la función de potencia activa del tipo de generador considerado para insertarla en el algoritmo de FPO, que tendría ahora la variable viento como dato de entrada.

3. RESULTADOS.

En el estudio fue utilizado el sistema estándar IEEE de 30 barras, los controles aplicados corresponden a los límites de inyección de potencia reactiva y a los límites de tensión en las barras, que se encuentran entre 1.1 y 0.9 en p.u; los transformadores permanecen con tap fijo en 1; otras informaciones del sistema están presentadas en el apéndice.

El objetivo se centró en realizar el despacho de potencia reactiva de la mano de la minimización del desvió de tensión y la reducción de pérdidas de potencia activa.

Una de las restricciones de desigualdad Ecuación (8), presente en el modelo de FPO, hace referencia a los niveles de potencia reactiva ofrecidos por el GIRB, esta disponibilidad fue obtenida teniendo en cuenta los datos de potencia activa arrojados por la función de aproximación y están presentados en la tabla 2.

Considerando un parque eólico conectado en la barra 8 (figura 1A en el apéndice), fueron realizadas simulaciones para las velocidades puntuales del viento desde 6 [m/s] hasta 14 [m/s], teniendo en cuenta los datos de generación presentados en la tabla 2, los cuales hacen parte del modelo de FPO.

Velocidad del viento [m/s]	P [MW]	FP	Q [MVAr]
6	16.64	1	0
6.5	17.92	1	0
7	21.77	1	0
7.5	28.75	1	0
8	38.24	1	0
8.5	49.09	1	0
9	60.17	0.95	19.78
9.5	70.73	0.95	23.25
10	80.56	0.95	26.48
10.5	90.05	0.95	29.60
11	100.02	0.95	32.88
12	124.99	0.95	41.08
13	155.37	0.95	51.07
14	161.67	0.95	53.14

Tabla 2: Disponibilidad de Potencia activa y reactiva para el Parque eólico con la función de aproximación.

Fuente. Elaboración propia.

La Ecuación (2) tiene en cuenta un factor α que multiplica a la función de desvió de tensión; este factor juega un papel importante dentro de la función objetivo, ya que puede tomar diferentes valores dependiendo de la necesidad que se tenga en el análisis del sistema, α podría aumentar o disminuir en la medida que se requiera dar mayor o menor peso a la optimización del desvió de tensión, con el ánimo de aclarar la función de α dentro del objetivo planteado en el FPO fueron realizadas simulaciones para los siguientes valores de α (0.2, 1 y 1.8).

La figura 2 muestra la generación de potencia activa total del sistema.

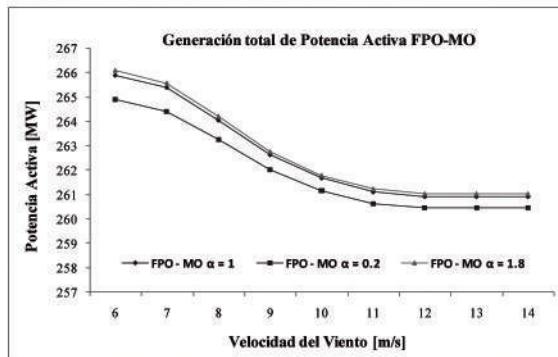


Figura 2: Generación total de Potencia Activa para el sistema IEEE de 30 barras modificado.

Fuente. Elaboración propia.

De la figura 2 se puede verificar que la generación de potencia activa es directamente proporcional a la reducción de pérdidas como es esperado.

En la figura 3 se presenta una comparación entre los perfiles de tensión para el sistema IEEE de 30 barras modificado, vía flujo de carga (sin considerar optimización) y vía FPO aplicando la optimización multiobjetivo propuesta en este trabajo, el perfil para el flujo de carga fue obtenido con el programa Matpower 4.1. (Versión de prueba).

Se puede ver claramente la mejora en el perfil de tensión cuando es aplicado el FPO multiobjetivo, siendo el mejor caso para $\alpha=1.8$ y el peor para $\alpha=0.2$, este comportamiento del sistema es lógico, dado que se tiene mayor peso en la optimización del perfil al tener un mayor valor del parámetro α .

Una comparación de las pérdidas de potencia activa vía flujo de carga [Tinney & Hart, 1967] (sin considerar optimización) y vía FPO es presentada en la figura 4. Se puede observar una significativa reducción de pérdidas para todos los valores de α al

aplicar el FPO multiobjetivo; el mejor caso se presenta para $\alpha=0.2$, este comportamiento es justificado dado que para este valor, se tiene mayor peso para la función de minimización de pérdidas dentro del objetivo planteado en FPO. A partir de 12 [m/s] el valor de pérdidas activas

No presenta alteraciones, debido a la cantidad de potencia activa generada para este rango de velocidades la cual es constante. Considerando que la generación de energía eólica tiene un bajo costo por MW/h, esta situación de funcionamiento del sistema puede ser viable, aun si se produjera un aumento en las pérdidas de potencia activa.

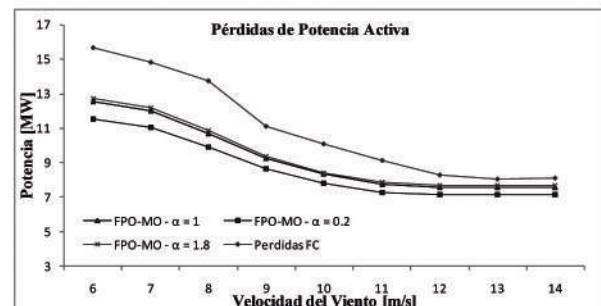


Figura 4: Comparación de pérdidas de Potencia Activa - Flujo de Carga Vs FPO – FMO para el sistema IEEE de 30 barras modificado.

Fuente. Elaboración propia.

Para verificar el porcentaje de ganancia en términos de reducción de pérdidas se presenta una comparación en la tabla 3.

La columna 2 muestra el valor de las pérdidas encontradas por el flujo de carga, las pérdidas obtenidas por el FPO multiobjetivo con un factor $\alpha=1$ son presentadas en la columna 3, de esta manera el porcentaje de reducción verifica la ganancia al aplicar el análisis de flujo de potencia óptimo.

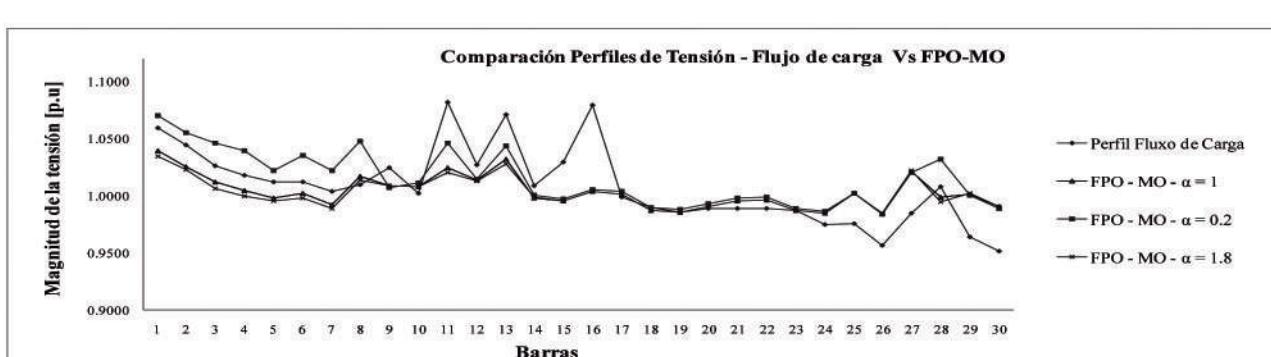


Figura 3: Comparación de los perfiles de tensión a través de Flujo de Carga y FPO –Función Multiobjetivo (FMO).

Fuente. Elaboración propia.

Velocidad del viento [m/s]	Perdidas FC [MW]	Perdidas FPO-MO [MW] / $\alpha = 1$	Reducción de perdidas [%]
6	15.66	12.51	20.1%
7	14.81	12.01	18.9%
8	13.743	10.67	22.4%
9	11.094	9.25	16.6%
10	10.062	8.30	17.5%
11	9.114	7.73	15.2%
12	8.285	7.54	9.0%
13	8.017	7.54	5.9%
14	8.076	7.54	6.6%

Tabla 3: % de reducción de pérdidas activas para el sistema IEEE de 30 barras modificado.

Fuente. Elaboración propia.

4. CONCLUSIONES

El artículo presentó una metodología de análisis para el sistema estándar IEEE de 30 barras con la inserción de generadores eólicos, utilizando un FPO multiobjetivo, buscando reducir las pérdidas de potencia activa en la transmisión y la optimización de los perfiles de tensión.

El FPO puede ser considerado como una excelente herramienta para la realización de una variedad de estudios en sistemas eléctricos de potencia, para encontrar condiciones de operación óptimas que contribuya a un mejor desempeño, generando un impacto directo sobre su planeamiento y operación.

Las simulaciones realizadas en el sistema estándar IEEE de 30 barras muestran que la aplicación del FPO multiobjetivo es una estrategia apropiada para la reducción de pérdidas y la optimización de los perfiles de tensión.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo contó con el apoyo de la Universidad Federal de ABC (UFABC).

REFERENCIAS

- AMPL. (13/08/2014). A Modeling Language for Mathematical Programming, disponible en: <http://ampl.com/resources/the-ampl-book/chapter-downloads/> [Accesado el día 13 de agosto de 2014]
- ANEEL. (18/08/2014). Energía Eólica, disponible en: [www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-Energia_Eolica\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-Energia_Eolica(3).pdf) [Accesado el día 18 de agosto de 2014]
- BAPTISTA, E., BELATI, E. A., SOUSA, V. A. & DA COSTA, G. 2006. Primal-dual logarithmic barrier and augmented Lagrangian function to the loss minimization in power systems. *Electric Power Components and Systems*, 34, 775-784.
- BELATI, E., FILHO, A. S. & SALLES, M. 2013. Analysis of Reactive Power Capability for Doubly-Fed Induction Generator of Wind Energy Systems

Using an Optimal Reactive Power Flow.

GRANVILLE, S. 1994. Optimal reactive dispatch through interior point methods. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 9, 136-146.

HEIER, S. 2006. Grid integration of wind energy, Wiley.

IEO. (07/08/2014). World Energy Outlook 2011, disponible en http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/weo2011_web.pdf [Accesado el día 07 de agosto de 2014]

Knitro. (04/08/2014). User's Manual, disponible en: http://www.artelys.com/uploads/pdfs/Knitro80_UserManual.pdf [Accesado el día 04 de agosto de 2014]

SGUAREZI FILHO, A. J. & DE OLIVEIRA FILHO, M. E. 2011. A predictive power control for wind energy. *Sustainable Energy, IEEE Transactions on*, 2, 97-105.

TINNEY, W. F. & HART, C. E. 1967. Power flow solution by Newton's method. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, 1449-1460.

XU, L. & CARTWRIGHT, P. 2006. Direct active and reactive power control of DFIG for wind energy generation. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 21, 750-758.

APÉNDICE

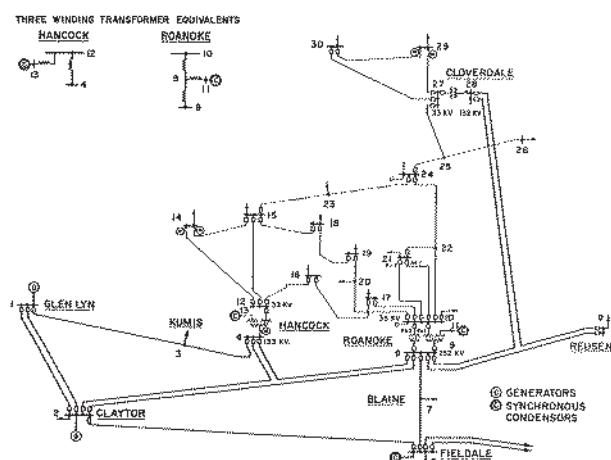


Figura 1A: Configuración para el sistema IEEE de 30 barras modificado.

Fuente. Tomada de http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf30/pg_tca30fig.htm

Barra	P.Gen [MW]	Q.Gen [MVar]	Q.max [MVar]	Q.min [MVar]
1	260.00	-16.00	-50.00	50.00
2	40.00	50.00	-40.00	50.00
5	0.00	37.00	-40.00	40.00
8	Mostrado en la tabla 3	---	Mostrado en la tabla 3	0.00
11	0.00	16.20	-6.00	24.00
13	0.00	10.60	-6.00	24.00

Tabla 1A: Barras con generación de potencia - sistema IEEE de 30 barras modificado.

Fuente. Datos tomados de <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf30/ieee30cdf.txt>

De	Para	Resistencia [p.u.]	Reactancia [p.u.]	Suceptancia [p.u.]
1	2	0.0192	0.0575	0.0528
1	3	0.0452	0.1652	0.0408
2	4	0.0570	0.1737	0.0368
3	4	0.0132	0.0379	0.0084
2	5	0.0472	0.1983	0.0418
2	6	0.0581	0.1763	0.0374
4	6	0.0119	0.0414	0.0090
5	7	0.0460	0.1160	0.0204
6	7	0.0267	0.0820	0.0170
6	8	0.0120	0.0420	0.0090
6	9	0	0.2080	0
6	10	0	0.5560	0
9	11	0	0.2080	0
9	10	0	0.1100	0
4	12	0	0.2560	0
12	13	0	0.1400	0
12	14	0.1231	0.2559	0
12	15	0.0662	0.1304	0
12	16	0.0945	0.1987	0
14	15	0.2210	0.1997	0
16	17	0.0524	0.1923	0
15	18	0.1073	0.2185	0
18	19	0.0639	0.1292	0
19	20	0.0340	0.0680	0
10	20	0.0936	0.2090	0
10	17	0.0324	0.0845	0
10	21	0.0348	0.0749	0
10	22	0.0727	0.1499	0
21	22	0.0116	0.0236	0
15	23	0.1000	0.2020	0
22	24	0.1150	0.1790	0
23	24	0.1320	0.2700	0
24	25	0.1885	0.3292	0
25	26	0.2544	0.380	0
25	27	0.1093	0.2087	0
27	28	0	0.3960	0
27	29	0.2198	0.4153	0
27	30	0.3202	0.6027	0
29	30	0.2399	0.4533	0
8	28	0.0636	0.2000	0.0428
6	28	0.0169	0.0599	0.0130

Barra	P. Carga [MW]	Q. Carga [MVar]
1	0.00	0.00
2	21.70	12.70
3	2.40	1.20
4	7.60	1.60
5	94.20	19.00
6	0.00	0.00
7	22.80	10.90
8	0.00	0.00
9	0.00	0.00
10	5.80	2.00
11	0.00	0.00
12	11.20	7.50
13	0.00	0.00
14	6.20	1.60
15	8.20	2.50
16	3.50	1.80
17	9.00	5.80
18	3.20	0.90
19	9.50	3.40
20	2.20	0.70
21	17.50	11.20
22	0.00	0.00
23	3.20	1.60
24	8.70	6.70
25	0.00	0.00
26	3.50	2.30
27	0.00	0.00
28	0.00	0.00
29	2.40	0.90
30	10.60	19.00

Tabla 3A: Datos de carga para el sistema IEEE de 30 barras modificado.

Fuente. Datos tomados de <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf30/ieee30cdf.txt>

Tabla 2A: Datos de línea para el sistema IEEE de 30 barras modificado.

Fuente. Datos tomados de <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf30/ieee30cdf.txt>

Herramientas *Lean* para apoyar la implementación de sistemas de gestión de la energía basados en ISO 50001

Lean Tools to Support the Implementation of Energy Management Systems Based on ISO 50001

David Bernardo Rojas - Rodríguez^{a*}, Omar Prías - Caicedo^a

Recibido: agosto 30 de 2014
Recibido con revisión: septiembre 4 de 2014
Aceptado: septiembre 27 de 2014

^{a*}Universidad Nacional de Colombia
Sede Bogotá,
Facultad de Ingeniería
Cra 30 N° 45-00 ed:411 of: 203 B
Bogotá, Colombia
Tel.: + (57) 3165000 ext:11145
dbrojasr@unal.edu.co

RESUMEN

Los sistemas de gestión de la energía (SGE) representan una herramienta para que las empresas aborden de manera conjunta sus problemáticas actuales en energía, productividad y competitividad. Con la expedición de la norma ISO 50001: Sistemas de Gestión de la Energía, Lineamientos con orientación para su uso, se genera un amplio marco de trabajo en esta temática, el cual abre una oportunidad desde el ámbito investigativo sobre el impacto de diferentes técnicas y herramientas para la implementación de un SGE. Buscando aportar a esta área, el presente artículo realiza un estudio de las herramientas basadas en los principios Lean, que se han desarrollado para lograr mejoras energéticas en la industria, identificando la manera en que pueden apoyar la planeación, implementación y operación de un sistema de gestión de la energía. A través del análisis, se encontró que las herramientas de mejora energética basadas en Lean, generan mayoritariamente contribuciones para cumplir los requisitos de 'Revisión Energética', 'Verificación y Control Operacional' de la norma ISO 50001, mientras que las herramientas tradicionales de Lean y otras desarrolladas en áreas de apoyo para la gestión de la energía, generan contribuciones para los requisitos de 'control operacional' y 'seguimiento medición y análisis'.

PALABRAS CLAVE

Eficiencia Energética; ISO 50001; Sistemas de Gestión de la Energía.

ABSTRACT

The energy management systems (EnMS) represent a tool for the industries to face in an integral manner its energy, productive and competitive challenges. With the expedition of ISO 50001: Energy Management Systems, requirements with guidance for use, a broad field of application is open, where the academic field may have important contributions related to the impact of different tools in the implementation of an EnMS. Based on this context, the present document develops a study about the tools based on Lean Principles that have been developed to achieve better energy performance in industries. The tools and methodologies found are organized to identify the way they can contribute to the design, implementation and operation of an EnMS. Through the analysis it is found that Energy Lean based tools have important contributions specially to the 'Energy review' and 'Energy baseline' requirements of ISO 50001, while traditional Lean tools and others developed in support areas for energy management present major contributions to the 'Implementation and Operation' and 'Monitoring, Measuring and analysis' requirements.

KEYWORDS

Energy Efficiency; ISO 50001; Energy Management Systems (EnMS); Lean Manufacturing.

1. INTRODUCCIÓN

Los modelos industriales actuales se encuentran altamente influenciados por preocupaciones ambientales y poblacionales que se intensificaron a finales del siglo XX. Entre ellas encontramos el posible agotamiento de los recursos o detrimento en su calidad, la necesidad de atender de manera más eficiente a poblaciones en constante crecimiento y la necesidad de competir en un mundo globalizado [Puvanasvaran, 2012]. Desde el punto de vista energético, estas situaciones se traducen para las industrias en precios crecientes de los energéticos, nueva regulación ambiental con impacto en la energía y clientes preocupados por la adopción de productos energéticamente eficientes [Bunse, et al., 2011]. Las empresas deben atender estas preocupaciones mientras continúan con sus labores misionales, en un escenario de incertidumbre que a menudo se suma a dificultades para entender el tipo de energéticos que requieren, la estructura de los precios energéticos y controlar las fuentes de aprovisionamiento del servicio [Chiu, et al., 2012]. Para afrontar la situación, las empresas suelen desarrollar prácticas de eficiencia energética que generalmente no tienen en cuenta las implicaciones en los usos internos de la energía dentro de toda la organización ni elementos de gestión de la energía [Bunse et al., 2011; Russell, 2007].

Frente a este panorama, los Sistemas de Gestión de la Energía (SGE), se presentan como una solución que permite atender de manera armónica las necesidades energéticas de las empresas en conjunto con su estrategia empresarial [Chiu et al., 2012; et al., 2013]. Al basarse en un enfoque de procesos, los SGE tienen capacidad de adaptarse efectivamente a los sistemas productivos de las empresas [La Bruna & Zafred, 2011].

En el 2011, la organización mundial de estandarización (ISO), emitió la norma ISO 50001 la cual recoge en un único estándar los principales elementos de modelos de gestión de la energía desarrollados previamente. Se espera que esta norma llegue a relacionarse con el 60% del uso global de la energía [Ranky & Tag, 2012]. El estándar fue adoptado por Colombia a finales del 2011 mediante la norma NTC-ISO/50001 [ICONTEC, 2011].

Para mayo de 2014, existían alrededor de 7500 sitios certificados en ISO 50001, con el 46.9% ubicándose en Alemania y 4 de ellas en Colombia [DIN, 2014]. Pese a esta situación, el estándar resulta novedoso y la comunidad académica apenas empieza a analizar empírica y conceptualmente su estructura y efectividad [Böttcher & Müller, 2014].

Contribuyendo al desarrollo de estrategias para atender de manera efectiva a las oportunidades surgidas alrededor de los sistemas de gestión, el presente artículo busca proponer un esquema basado en pensamiento

Lean, que permita apoyar el desarrollo de Sistemas de Gestión que den cumplimiento a la norma ISO 50001. El sistema de producción *Lean*, o simplemente filosofía *Lean*, se basa en los principios establecidos por Womack, Jones y Roos en los años noventa a través del libro *The Machine that changed the world* [Holweg, 2007]. Las prácticas basadas en este concepto se extienden actualmente a numerosas aplicaciones y comparten algunos principios con los sistemas de gestión de la energía, por ello existe un importante potencial de aplicación de ambos conceptos de manera conjunta [Ranky & Tag, 2012; Seryak & Kissack, 2005].

Se espera que los resultados encontrados permitan formular estrategias prácticas para abordar la planeación, implementación y operación de sistemas de gestión de la energía en industrias. De igual manera, se espera orientar empresas con sistemas *Lean* implementados sobre las facilidades que podrían tener para instalar sistemas de gestión de la energía y las herramientas que podrían usar en el proceso.

Para abordar la temática, se inicia por la revisión de los principales conceptos de *Lean* y de Gestión de la Energía, analizando posteriormente los aportes en la literatura que tratan el tema de manera conjunta. Los artículos encontrados se organizan según la manera en que podrían articularse con un Sistema de Gestión de la Energía, con base en el ciclo de mejoramiento continuo PHVA. Finalmente se destacan los principales aspectos que pueden atenderse a través de las herramientas estudiadas en el contexto de la ISO 50001 y se generan recomendaciones para su aplicación en el sector productivo.

2. GESTIÓN DE LA ENERGÍA

La gestión de la energía, entendida en un sentido amplio como la estrategia para satisfacer la demanda energética en el lugar y momento en que sea necesario, comenzó a ser una preocupación para el sector industrial durante la crisis energética de 1970 en la que se dio un alza de precios en los energéticos sin referentes históricos [Abdelaziz, et al., 2011]. En esta primera tendencia continuada durante la segunda mitad de la década, las preocupaciones se centraron en el ahorro de energía y adaptación a las restricciones de la oferta, motivando cambios tecnológicos y cambios en el estilo de vida [Prías, 2006]. En este contexto O'Callaghan & Probert [1977], ofrecen una definición de la gestión de la energía como la aplicación de la conversión y la utilización de la energía tanto a los recursos como a la oferta, [...] para lograr los mismos objetivos con menos requerimientos de potencia' [O'Callaghan & Probert, 1977] citado por [Bunse et al., 2011].

Luego de la segunda crisis del petróleo en 1979, se desarrolla el concepto de gestión de la demanda, a través del cual se crean herramientas tecnológicas y políticas para manejar la evolución de la demanda de energía. A mediados de los años ochenta se evoluciona al uso racional de la energía, donde se exige que además de resultados en energía haya resultado de costos y en los años noventa se engloban estos conceptos en la eficiencia energética, a través del cual se agregan los conceptos para caracterizar el uso de la energía a nivel macroeconómico [Prías, 2006]. A partir de

esta década los proyectos en energía para la industria empezaron a tener gran difusión, observando en el caso de Estados Unidos un aumento exponencial en las inversiones de proyectos de eficiencia energética realizadas por la industria entre los años 1990 y 2000 [Gorp & Van Gorp, 2004].

Paralelamente en otras disciplinas como la ambiental y la productiva, surgieron nuevos conceptos que convergieron con la perspectiva energética en el ámbito empresarial. La figura 1 extraída de [Prías, 2006] reseñando un trabajo previo del autor, muestra la convergencia de estos aspectos. En este trabajo se argumenta cómo este panorama posibilita la integración de conceptos y se propone un nuevo enfoque de gestión de la energía que integre las principales tendencias de cada área sobre una base de gestión moderna.

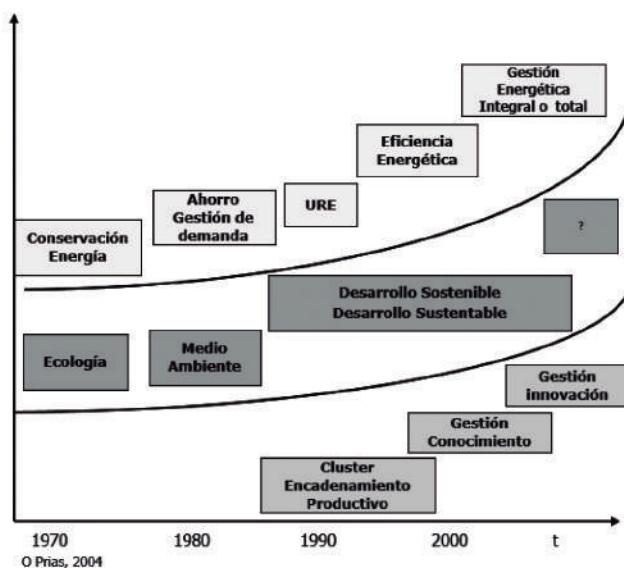


Figura 1: Evolución del concepto de gestión energética
Fuente. [Priás, 2006]

De manera consecuente, los trabajos recientes en gestión de la energía abordan la temática en conjunto con otras dimensiones de la empresa, como la calidad y la logística [Bunse et al., 2011]. Igualmente, los avances tecnológicos en áreas distintas a la energía, particularmente en la información y telecomunicaciones, se han integrado en las últimas décadas a las prácticas de gestión energética y hoy en día juegan un importante rol en la gestión de la energía tanto a nivel industrial como residencial [Suganthi & Samuel, 2012; Aman, et al., 2013].

2.1 Gestión de la energía en el contexto colombiano

Colombia presenta una importante trayectoria en Gestión de la Energía con un liderazgo marcado desde el sector investigativo. En el 2003 se creó la Red Colombiana de Conocimiento en eficiencia energética, la cual organizó tres versiones del Congreso Internacional sobre Uso Racional y Eficiente de la

Energía ['CIUREE' 2004, 2006 y 2008] en los que 'la administración y gestión de la energía' fue uno de los ejes temáticos. Además varias universidades colombianas desarrollaron en este periodo herramientas y metodologías de gestión energética para la industria [PEN-SGIE, 2013].

Recogiendo estos antecedentes, en el 2007 se desarrolla el modelo de Gestión Integral de la Energía que posteriormente dio origen al Sistema de Gestión Integral de la Energía, SGIE [Campos, 2008; UPME, 2007]. Con este antecedente, se desarrolló entre 2010 y 2013 el Programa Estratégico Nacional en Sistemas de Gestión Integral de la Energía, a través del cual se ha trabajado la implementación de Sistemas de Gestión de la Energía en 12 empresas a nivel nacional [PEN-SGIE, 2013]. Actualmente este trabajo se continúa mediante la *Consolidación de la Red Colombiana de Conocimiento en Eficiencia Energética*, programa financiado por Colciencias que, entre otros aspectos, involucra la continuidad del PEN-SGIE.

2.2 SISTEMAS DE GESTIÓN DE LA ENERGÍA E ISO 50001

Los sistemas de gestión de la energía permiten alinear de manera simultánea la actual gama de disciplinas relacionadas con la gestión de la energía, trayendo al mismo tiempo beneficios ambientales y económicos [Rudberg et al., 2013].

En el 2011 fue emitida la norma internacional *ISO 50001: Sistemas de gestión de la energía requisitos con orientación para su uso*, la cual recoge los principales antecedentes en Sistemas de Gestión de la Energía que se habían desarrollado a nivel mundial [Bunse et al., 2011]. Colombia adoptó el estándar a finales de este mismo año a través de la NTC-ISO 50001 y para mayo de 2014 cuatro empresas contaban con la certificación [DIN, 2014]. La norma define un sistema de gestión de la energía como "el conjunto de elementos interrelacionados mutuamente o que interactúan para establecer una política y objetivos energéticos, y los procesos y procedimientos necesarios para alcanzar dichos objetivos" [ICONTEC, 2011].

El fin de un sistema de gestión de energía según la ISO 50001 es lograr el mejoramiento continuo del desempeño energético, entendido como los "resultados medibles relacionados con la eficiencia energética, el uso de la energía y el consumo de la energía" [ICONTEC, 2011]. Para el sector productivo, esta definición implica tener en cuenta variables tanto energéticas como de producción [Carretero Peña & García Sánchez, 2012].

Numerosos programas de energía en el mundo están tomando la ISO 50001 como guía, entre ellos cabe citar el *Superior Energy Performance (SEP) Certification Program* en Estados Unidos [Scheihing et al., 2013] y el *Industrial Energy Efficiency Program* de UNIDO con impacto en varios países en desarrollo [Ates & Durakbasa, 2012; Ottermann, 2011; Wessels, 2011].

En el presente artículo se tomará la estructura de la norma ISO 50001 como base para el análisis de sistemas de gestión de la energía, dadas las características de difusión internacional y representatividad del estandar.

3. LEAN MANUFACTURING

El concepto de Lean Manufacturing se difundió por medio de los libros de Womack, Jones y Roos publicados a principios de los noventa, en los que se identifican los principios esenciales del método de producción Toyota y se crean bases para su aplicación en compañías fuera del ámbito japonés y de la industria automotriz [Holweg, 2007]. El concepto se basa en la reducción de desperdicios, entendidos como todo aquello que no genera valor para el cliente y agrupados en ocho categorías [Miller, et al., 2010].

Numerosas herramientas de gestión con gran difusión en la industria actual, tales como el justo a tiempo, el flujo de producción de una sola pieza o las 5s se asocian comúnmente al sistema de producción Lean [Puvanasvaran, 2012]. Los principios rectores de este concepto se han aplicado en diversas áreas incluyendo el sector servicios [Ritchie & Angelis, 2010], las cadenas de abastecimiento [Cabral, et al., 2011; Wu, 2009] y el reverdecimiento empresarial [Miller et al., 2010], por lo que en algunos contextos resulta más apropiado hablar de un Pensamiento Lean (*Lean Thinking*) que de *Lean Manufacturing*, dado que este segundo término podría entenderse como limitado a la producción de bienes. Dentro de este artículo se usará el término *Lean* para referirse de manera general a los conceptos y herramientas asociadas a *Lean Manufacturing* o al pensamiento *Lean*.

4. RELACIÓN ENTRE LEAN Y GESTIÓN DE LA ENERGÍA

La relación entre los sistemas de gestión de la energía y *Lean* es fácilmente identificable si se parte del principio de que ambos buscan reducir desperdicios energéticos [Sciortino, et al., 2009; Seryak & Kissock, 2005; Ranky, 2010]. Partiendo de este principio, numerosos estudios identifican la mejora energética como la consecuencia de la implementación de *Lean* o de herramientas catalogadas dentro de este concepto.

Adicionalmente, existen metodologías para mejora energética desarrolladas a partir de los principios de

Lean, categoría resulta de especial interés para los sistemas de gestión de la energía ya que permite identificar herramientas y metodologías que pueden ser aplicadas en la implementación y operación de un SGE por parte de una empresa.

Buscando categorizar las herramientas disponibles según su aplicación práctica en Sistemas de Gestión de la Energía, se organizaron y catalogaron los artículos encontrados, en función de las etapas de un sistema de gestión bajo el ciclo de mejoramiento continuo PHVA. La figura 2 resume la clasificación realizada. En las siguientes secciones se explorará en detalle cada una de estas áreas para posteriormente realizar recomendaciones específicas hacia la implementación de un sistema basado en ISO 50001.

5. MEJORAMIENTO ENERGÉTICO COMO CONSECUENCIA DE LA APLICACIÓN DE LEAN

Diversos estudios han abordado los beneficios energéticos que pueden obtenerse como consecuencia directa de la implementación de Lean en la industria.

Un primer aspecto que se resalta, es la facilidad que tienen las empresas con herramientas o pensamiento *Lean* en su cultura organizacional para generar acciones de mejora energética. Se estima por ejemplo, que como consecuencia de la implementación de Lean en las fábricas europeas de Toyota se alcanzó un 37% de ahorro energético por vehículo [Peng, 2010].

Oppenheim [2006], argumenta que los ahorros energéticos se dan como consecuencia de la productividad obtenida, de dónde propone que el esfuerzo (financiero y técnico) para la mejora energética debe hacerse sobre la producción y no sobre la energía. Por su parte Khalaf, et al. [2011], desarrollaron y validaron con una muestra de 55 empresas un modelo que ilustra cómo la implementación de *lean manufacturing* genera beneficios sobre la eficiencia energética.

La influencia de *Lean* sobre la gestión de la energía se explica a través de diferentes herramientas asociadas a este concepto. De esta manera, Khalaf, et al. [2011], muestran que el HRM (Human Resource Management) tiene influencia en mejora de la eficiencia laboral y el TQM (Total Quality Management) en la capacidad de utilización, y que ambos factores influencian la eficiencia energética. Oppenheim [2006] menciona el tamaño de lote individual, la reducción de inventarios, la producción en celdas JIT y la flexibilidad del proceso como fuentes de ahorro energético. Por su parte Puvanasvaran et al. [2012] muestran al Kaizen como la práctica más difundida en las empresas con Sistemas de Gestión Ambiental implementados.

En el ámbito de sistemas de gestión, existe una rama de estudios que ha abordado la relación entre *Lean* y la implementación de Sistemas de Gestión Ambiental (SGA), nombrando, entre otros, beneficios energéticos. King & Lenox [2009], plantean una relación positiva entre *Lean* y el establecimiento de sistemas de gestión ambiental, asociada a la reducción de costos de

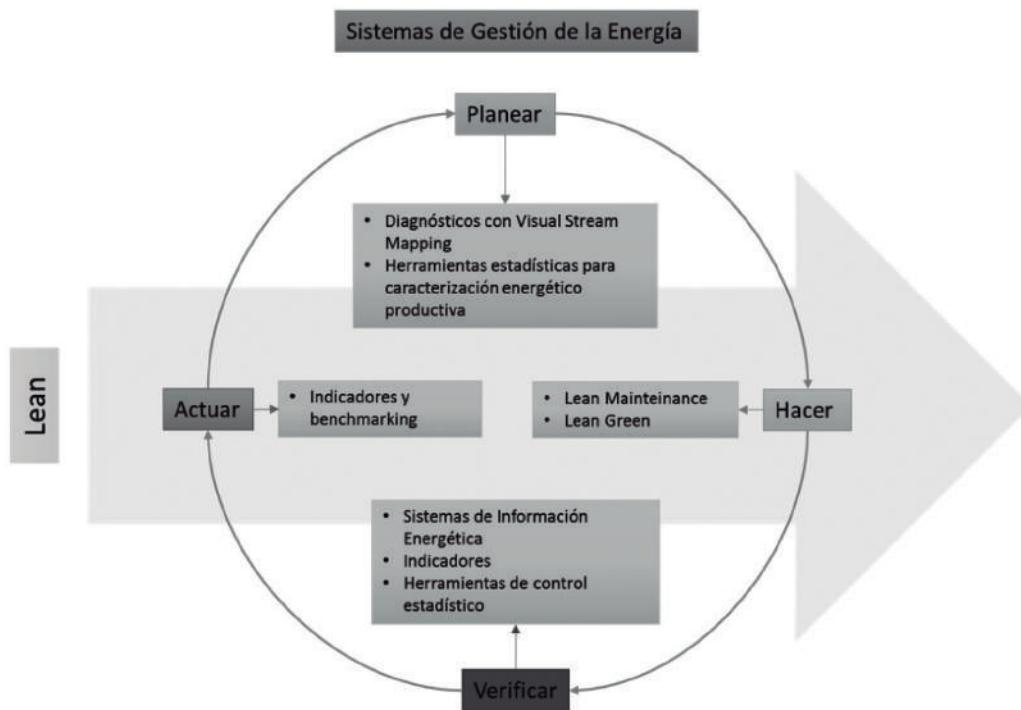


Figura 2: Categorización de la literatura que relaciona Lean con Gestión de la Energía
Fuente. Elaboración propia.

implementación y de la incertidumbre sobre el impacto de las acciones adelantadas. Puvanasvaran et al. [2012] demuestran que una muestra significativa de empresas con Sistemas de Gestión Ambiental implementados había adoptado al menos una práctica de producción *Lean*. Dües, et al. [2013] plantean entre los elementos comunes de los paradigmas Verde (Green) y Lean, la reducción de desperdicios y los indicadores clave de desempeño (KPI); y entre los elementos conflictivos señalan que para Lean el fin son los costos y para Green el ambiente.

Aunque la literatura no ha estudiado ampliamente el impacto de los SGE basados en ISO 50001 [Böttcher & Müller, 2014], es de esperar que muchas de las relaciones encontradas para ISO 14001 se puedan extender al ámbito de la energía, debido a la coincidencia en aspectos estructurales de las normas [Chiu et al., 2012]. No obstante, dado que los SGE tienen una relación con ahorros en costos más marcada que los SGA [Ranky & Tag, 2012] puede que también muestren menos puntos conflictivos con *Lean*.

6. MEJORAMIENTO ENERGÉTICO COMO OBJETIVO DE LA APLICACIÓN DE LEAN

Los casos en que los conceptos de *Lean* se han organizado para producir nuevas herramientas de gestión enfocadas en el mejoramiento del desempeño energético de la empresa se han clasificado según su incidencia en el proceso de mejoramiento continuo (o ciclo PHVA) de la norma ISO 50001, mostrado en la Figura 3.



Figura 3: Ciclo de mejoramiento continuo de la norma ISO 50001

Fuente. Tomado de NTC-ISO 50001[ICONTEC, 2011]

En el área de Planificación (P), se incluyen las herramientas relacionadas con la planificación energética, en el Hacer (H) las relacionadas con implementación y operación y en el Verificar (V), las relacionadas con la verificación. Para el Actuar (A), cuya actividad principal es la revisión de la dirección, no se incluyeron herramientas específicas, no obstante se resalta que las herramientas de la etapa de verificación, especialmente (indicadores y sistemas de monitoreo) generan facilidades para su realización.

Las herramientas relacionadas con Sistemas de Gestión de la Información de la energía, se ubicaron en el Hacer y Verificar. Es importante resaltar que estas herramientas representan un área de trabajo amplia con numerosas publicaciones específicas (más que en las otras áreas) por lo que su estudio y clasificación puede representar por sí mismo un área de trabajo independiente, que escapa a la revisión realizada en el presente artículo.

6.1 Herramientas de planificación energética

Diagnóstico Energético a través de Value Stream Mapping

El Value Stream Mapping (VSM) es una herramienta de *Lean* caracterizada por su sencillez y facilidad de uso que permite identificar el flujo de valor dentro de la empresa e identificar las fuentes potenciales de desperdicios. Keskin & G. Kayakutlu [2012] integran el Value Stream Mapping con las redes Bayesianas para plantear una metodología de construcción de mapas en Eficiencia Energética, que además de generar diagnósticos, permitan formular escenarios de futuro que reflejen los resultados de acciones de mejora. Paju et al. [2010] proponen una técnica denominada *Sustainable Manufacturing Mapping* (MPP) que combina las mejores características de *Value Stream Mapping* (VSM), *Discrete Event Simulation* (DES) y *Life Cycle Assessment* (LCA) y se enfoca en mostrar los avances hacia las metas de sostenibilidad de la organización, dentro de las que se incluyen las energéticas.

Una iniciativa relacionada con la planificación que vale la pena destacar, es la metodología utilizada por el Consejo Americano de Energía, para desarrollar programas de eficiencia energética basados en *Lean* en industrias de Estados Unidos [Sciortino & Watson, 2009]. Esta metodología, desarrollada para la EPA en el 2007 y revisada en el 2011, incluyó el trabajo conjunto de especialistas en *Lean*, con el personal de seis plantas seleccionadas para un piloto. El proceso incluyó capacitación de términos y mediciones de energía, concientización de personal, el desarrollo de value stream mapping de energía y establecimiento de metas en términos de *Lean*.

Herramientas estadísticas para la identificación de consumos energéticos no asociados a la producción y elaboración de líneas base

Las metodologías de Lean Energy Analysis (LEA) [John Seryak, et al., 2005] y Lean Energy [Gopalakrishnan, et al., 2012], se basan en el principio de reducción de desperdicios para identificar las oportunidades de mejoramiento energético en la empresa y trazar una línea de mejoramiento en esta área. De manera similar, el modelo colombiano SGIE, basa el análisis de ahorros

potenciales de energía en el establecimiento de una línea base que parte de una relación lineal entre la energía y la producción, obtenida con datos históricos de la empresa. [Campos, 2008; González et al., 2012]. En todos los casos, a través de herramientas estadísticas se identifica la energía no asociada a la producción y se generan líneas base, sin embargo los conceptos muestran algunas diferencias:

- El LEA, se desarrolló en Estados Unidos buscando una metodología práctica para identificar los usos mínimos teóricos de la energía a nivel de empresas individuales, en complemento a las metodologías desarrolladas para hallar estos mínimos a gran escala (niveles sectoriales o de país). El LEA tiene un amplio componente estadístico ver por ejemplo [Abels, et al., 2011] pero también incluye el análisis individual de equipos bajo la filosofía de reducción de desperdicios energéticos que no agreguen valor al cliente.
- El enfoque de *Lean Energy* [Gopalakrishnan et al., 2012], señala que en el campo energético la identificación de desperdicios presenta una mayor complejidad que en *Lean Manufacturing*, por la existencia de consumos de energía no esenciales (NEEC), escondidos en los procesos. La metodología plantea que los NEEC pueden encontrarse a través de análisis de Benchmarking y por ello propone la identificación de un patrón mínimo de consumo por sectores (que se denomina línea base). La obtención de este patrón mínimo involucra la caracterización detallada de varias empresas del sector a través de herramientas cualitativas y cuantitativas, con un fuerte enfoque estadístico. Una empresa más esbelta (i.e *Lean*) será aquella que logre acercarse más a la línea base del sector.

6.2 Herramientas de implementación y operación.

En esta categoría se encuentran herramientas asociadas a áreas de apoyo y áreas transversales al proceso de gestión de la energía, tales como mantenimiento y producción. Algunos de los aspectos nombrados no están enfocados directamente en el mejoramiento energético, pero su uso presenta y una oportunidad para alinear las prácticas de producción con las energéticas.

Mantenimiento basado en *Lean*

El mantenimiento es una parte fundamental del proceso de gestión de la energía con requisitos específicos en la norma ISO 50001. En Colombia y como parte del PEN-SGIE, se desarrolló una metodología de mantenimiento centrado en eficiencia energética [Campos & Lora, 2009]. Desde el enfoque *Lean*, se pueden encontrar otras iniciativas desarrolladas en el ámbito internacional.

- La metodología *Lean Maintenance*, implementada en Intel Corporation [Sheng & Tofoya, 2010], se centra en factores culturales teniendo como principios 'Dar la bienvenida los problemas' y 'Odiar los desperdicios'. Los resultados de la aplicación de esta técnica en las actividades, conexiones,

flujos y mejoras del mantenimiento han generado resultados en disponibilidad de equipos y ahorros en costos. El modelo se desarrolló en un sector que tradicionalmente no es intensivo en uso energético, pero los resultados alcanzados sugieren que su implementación en otros sectores podría representar grandes oportunidades de mejoramiento energético.

- X, Wang et al. [2012], describen la aplicación conjunta de Lean, Seis Sigma y Control de calidad en el mantenimiento de equipos para el sector militar y Zhao et al. [2012] proponen el trabajo con *Lean Six Sigma* junto al Diseño de experimentos para la aplicación en operaciones de mantenimiento de equipos. Ambos modelos están relacionados con variables que pueden tener impacto en la energía, sin embargo los enfoques planteados no se centran en esta variable. Nuevamente, la validación de estos principios en empresas intensivas en energía puede resultar una oportunidad con grandes ahorros potenciales para la industria.

Lean Green

El estudio de *Lean* para apoyar las metas ambientales de la empresa y procesos de reverdecimiento empresarial (*greening*), ha mostrado un gran desarrollo en la última década y representa por sí misma un área robusta de investigación. Para la temática abordada, cabe destacar que las variables energéticas se cuantifican en estos sistemas, generalmente con la intención de traducir los ahorros energéticos en reducción en emisiones de carbono ver p.ej [Miller et al., 2010; Peng, 2010]

Green IT

Las acciones de ahorro de energía y eficiencia energética sobre los sistemas de información, hacen parte del área que se ha denominado *Green IT* [Yoshino et al., 2010]. Las acciones en esta área incluyen el trabajo para la optimización energética de servidores y redes y pueden alinearse con las actividades de operación y mantenimiento de un SGE. Aunque el tema no se relaciona con los sectores tradicionalmente intensivos en energía, la rápida difusión del área de investigación y el aumento del uso de servicios de información hacen que resulte pertinente mantenerla bajo vigilancia para posibles inclusiones en el área de gestión de la Energía.

Un área del *Green IT* que resulta de mayor interés para gestión de la energía, es la reducción del consumo energético de operaciones industriales a través de las tecnologías de la información y comunicación. Yoshino et al. [2010] categorizan las operaciones que se pueden realizar a través del monitoreo con sistemas de información en las cuatro áreas mostradas en la Tabla 1. Aunque las operaciones nombradas se centran en manejo de equipos informáticos, los principios pueden trasladarse a equipos industriales con alto consumo de energía (mediante la automatización o instalación de Sistemas Supervisión, Control y Adquisición de Datos – SCADA-) con el consecuente aumento en los ahorros obtenidos. Mahjoub & Dandachi [2007] tocan en mayor detalle esta posibilidad, resaltando ventajas adicionales como

aumento en la seguridad, flexibilidad y modularidad de los sistemas, con la combinación de SCADAS y Sistemas de Gestión de la Energía.

Categorías del patrón	Operaciones típicas
Operaciones periódicas regulares.	Prendido y apagado de computadores.
Operaciones no-periódicas regulares	Mantenimientos, cambio de configuración.
Notificaciones	Reporte de estados, reporte de eventos.
Recuperación de errores	Detección de eventos de errores y realización de actividades de recuperación

Tabla 1: Patrones de operaciones de ahorro de energía en sistemas de información.

Fuente. [Yoshino et al., 2010]

6.3 Herramientas de verificación

Sistemas de información energética

Además de las actividades de control operativo, los sistemas de información tienen una amplia contribución en las actividades de monitoreo de un SGE a través de la generación de información requerida para la verificación de los mismos.

En el ejemplo del sistema para el control de la energía en la cadena de Resorts de Disney [Allen, 2006] no solo se resalta la capacidad de controlar los equipos de regulación del ambiente y otros consumidores de energía (correspondientes a las actividades de control operacional), sino la capacidad de obtener información conjunta de todos los hoteles e incluir rápidamente a los nuevos que se construyan en los indicadores de monitoreo energético. Otro ejemplo es el presentado por Swords, et al. [2008] que plantean una solución en sistemas de información denominada *Enterprise Energy Information System* (EEIS) que fue probada en grandes industrias y universidades en Dublin, instalando más de 100 medidores de energía eléctrica, de otros energéticos y de datos ambientales. En la práctica se demostró que el monitoreo fomentaba el surgimiento de nuevas ideas para el mejoramiento energético y que las acciones tomadas con base en la información obtenida lograron ahorros del 16% en las universidades y 8% en las calderas de la industria.

Indicadores para la medición de desempeño energético

Los indicadores tienen como objetivo resumir altos volúmenes de información en pocos datos de fácil entendimiento y son vitales para el mantenimiento de

un sistema de gestión de la energía [Van Gorp, 2005]. El uso de indicadores es un elemento común entre los sistemas de gestión y las prácticas Lean [Dües et al., 2013; Ang. B.W, 2006] Citado por [Bunse et al., 2011], habla de dos tipos de indicadores claves de desempeño (KPI): económicos o (de benchmarking) e indicadores físicos. Los primeros sirven al nivel estratégico de la organización y los segundos recogen información de procesos. Los autores resaltan la ausencia de indicadores físicos que se comuniquen adecuadamente con los estratégicos como una de las mayores debilidades en la industria actual. También resaltan la importancia de las herramientas de información y tecnología para realizar el monitoreo.

Otras categorías de indicadores también pueden asociarse a esta clasificación; La ISO 50001 exige la creación de indicadores de desempeño energético (IDEs o EnPIs en la versión en inglés) que permitan medir las mejoras en el desempeño energético. Aunque los planteamientos de la norma son amplios y permiten contar con indicadores de múltiples características T. Chiu et al. [2012], sugieren que se debe contar al menos con indicadores de consumo específico (a nivel de planta y de procesos) e indicadores a nivel de la alta gerencia que contengan esta información traducida a costos. El sistema global gestión de la energía (GEMS) de EXXON trabaja con *Key Energy Variables* (KEV), a nivel operativo, *Opportunity Lost Cost* (LOC) a nivel táctico e indicadores de *Benchmark* y competitividad a nivel superior Eidt, 2012; Paju et al. [2010] presentan indicadores a 5 niveles de la compañía que abarcan tanto la dimensión interna como el entorno. Por su parte metodologías como el Lean Energy Analysis [Seryak et al., 2005]; *Lean Energy* [Gopalakrishnan et al., 2012] y el SGIE [González et al., 2012], se centran en indicadores de los procesos productivos, aunque resumen información para el seguimiento de la alta gerencia. Oppenheim [2006] propone indicadores físicos basados en las mediciones manejadas en sistemas de Lean Manufacturing.

6.4 Cerrando el ciclo de mejoramiento continuo

El ciclo de mejoramiento continuo de un sistema de gestión concluye con la revisión por parte de la alta dirección y toma de decisiones para retroalimentación del sistema. Dentro de las herramientas estudiadas no se encontró ninguna que permita apoyar particularmente esta etapa. No obstante cabe mencionar que herramientas de monitoreo como los indicadores de nivel estratégico, permiten orientar la toma de decisiones para lograr una retroalimentación adecuada del desempeño energético de la organización.

Al respecto, cobra especial importancia el lograr alinear los indicadores de planta con indicadores de

nivel estratégico y de benchmarking que permitan reflejar las situaciones reales de la empresa desde el punto de vista energético y productivo.

7. RESULTADOS: APROXIMACIÓN METODOLÓGICA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SGE BAJO ISO 50001 USANDO HERRAMIENTAS LEAN

El análisis realizado, permite identificar que existe un potencial de contribución de herramientas *Lean* para gestión de la energía especialmente para ciertas tareas específicas del ciclo de mejoramiento continuo.

En la Figura 4, se muestra una relación de las herramientas y metodologías estudiadas, con los requisitos específicos que plantea la norma ISO 50001. Cada una de ellas, se clasificó según si se trata de herramientas asociadas tradicionalmente a sistemas *Lean*, desarrollos que se han hecho con base en principios *Lean* especialmente para análisis y mejora energética o herramientas basadas en principios *Lean* que atienden a temas de apoyo para la gestión de la energía.

Las herramientas para mejoramiento energético que se basan en principios *Lean* generan contribuciones mayoritariamente para la revisión energética destacándose:

- Las diferentes vertientes de la herramienta *Value Stream Mapping*, adaptadas para involucrar flujos o desperdicios energéticos Paju et al. [2010]; Sciortino & Watson [2009] permiten facilitar la identificación de áreas con uso significativo de la energía, actividad que hace parte del requisito 4.4.3 (revisión energética), de la norma ISO 50001.
- Las metodologías *Lean Energy Analysis* (LEA) [Seryak et al., 2005] y *Lean Energy* [Gopalakrishnan et al., 2012]. Aunque este enfoque no parte de principios *Lean*, tiene una estructura y finalidad similares a las otras herramientas señaladas.
- Cabe desataracar los aportes metodológicos del programa energético desarrollado para la EPA [Sciortino & Watson, 2009] con un componente para el entrenamiento de personal en desarrollo de programas de eficiencia energética, que podría aportar al requisito 4.5.2 (Competencia, formación y toma de conciencia).

En una segunda categoría, las herramientas usadas tradicionalmente en procesos de *Lean*, generan contribuciones específicas para distintas etapas del ciclo de mejoramiento continuo:

- Las metodologías prácticas para analizar los indicadores clave de desempeño (KPI) de una organización y asegurar que la medición física de los procesos energéticos se alinee con el aspecto estratégico, alimentan el requisito 4.4.5 de la norma (Indicadores de Desempeño Energético). Adicionalmente podrían facilitar la revisión por parte de la dirección (requisito 4.7) así como la transmisión de resultados de la empresa para su análisis por parte de actores de interés externos a la empresa, tales como entidades de estado o gremios, factor

PHVA	Requisitos norma ISO 50001	Herramientas para mejora energética basadas en Lean			Herramientas tradicionales de Lean Manufacturing		Herramientas basadas en Lean desarrolladas para áreas distintas a la energética	
Planear	4.1 Requisitos Generales							
	4.2. Responsabilidad de la Dirección							
	4.3 Política energética							
	4.4 Planificación Energética							
	4.4.1 Generalidades							
	4.4.2 Requisitos legales y otros requisitos							
	4.4.3 Revisión energética	1	2	3				
Hacer	4.4.4 Línea de base energética	5	6	7				
	4.4.5 Indicadores de desempeño energético	5	6	7	13	14		
	4.5 Implementación y Operación							
	4.5.2 Competencia, formación y toma de conciencia	4						
	4.5.3 Comunicación							
	4.5.4 Documentación				12		8	9
	4.5.5 Control Operacional							
Verificar	4.5.6 Diseño							
	4.5.7 Adquisición de servicios, productos, equipos.							
	4.6 Verificación						10	11
	4.6.1 Seguimiento, medición y análisis							
	4.6.2 Requisitos legales							
	4.6.3 Auditoría Interna del SGE							
	4.6.4 No conformidades							
Actuar	4.6.5 Control de registros							
	4.7 Revisión por la dirección				13	14		

1. Value Stream Maps for Industrial Energy Efficiency (Keskin y G. Kayakutlu 2012)
2. Sustainable Manufacturing Mapping (Paju et al. 2010)
3. Value Stream para flujos de energía (Sciortino, Watson, & Council, 2009).
4. Programas de capacitación en Eficiencia Energética basados en Lean (Sciortino, Watson, & Council, 2009).
5. Lean Energy Analysis (LEA) (John Seryak, Solutions, & Kissock, 2005)
6. Lean Energy (Gopalakrishnan, Mardikar, Gupta, Jalali, & Chaudhari, 2012)
7. Lineas Base, Sistema de Gestión Integral de la Energía (González et al., 2012)
8. Lean Maintenance (Sheng & Tofoya, 2010)
9. Lean-Six Sigma para mantenimiento de equipos (D.Zhao et al. 2012)
10. Green IT
11. Enterprise Energy Information System (EEIS) (Swords, Coyle & Norton (2008))
12. Control de variabilidad Lean-Six Sigma
13. Indicadores físicos e indicadores de benchmarking (Ang. B.W 2006)
14. Sistema global gestión de la energía (GEMS) de EXXON (Eidt, 2012)

Figura 4: Relación de ISO 50001 con las principales herramientas encontradas
Fuente. elaboración propia

que, aunque no hace parte de la norma, si es de interés para la difusión de la gestión de la energía en el sector productivo.

- Los sistemas de medición y monitoreo, son aspectos que se han integrado con una tendencia marcada en los sistemas *Lean-Six Sigma*. La robustez que han llegado a tener estos sistemas para el monitoreo en tiempo real de variables de operación, los hace muy atractivos para responder al requisito 4.6.1 *Seguimiento, medición y análisis*
- En el requisito 4.5 (Implementación y Operación), las herramientas *Lean-Six Sigma* permiten por si solas identificar prácticas de operación y mantenimiento relacionadas con usos significativos de energía (requisito 4.5.5 Control operacional). Como lo resalta Oppenheim [2006], es natural obtener mejoras energéticas como consecuencia de mejoras productivas asociadas a la implementación de *Lean*. Un sistema de gestión podría potenciar esta situación al hacer explícitas las prácticas de operación y mantenimiento que contribuyen directamente a un mejor desempeño energético,

documentándolas y generando registros para su seguimiento.

Finalmente, las herramientas que se han desarrollado con principios *Lean* para atender a temáticas de apoyo a la gestión de la energía, contribuyen en la operación y seguimiento del sistema. Específicamente:

- El requisito 4.5.5 (Control Operacional) se ve enriquecido a través de las técnicas de mantenimiento basadas en *Lean*, las cuales proponen maneras prácticas de identificar operaciones efectivas de mantenimiento, que podrían enfocarse en factores energéticos.
- Las herramientas basadas en sistemas de información resultan fundamentales para el monitoreo de las variables clave asociadas a los usos significativos de la energía, aportando al cumplimiento del requisito 4.6.1, 'Seguimiento medición y análisis'.

8. CONCLUSIONES

En el presente artículo, se revisó el estado del arte sobre el análisis de la relación entre el pensamiento *Lean* y gestión de la energía, con el objetivo de proponer un enfoque estructural para facilitar la implementación de Sistemas de Gestión de la Energía en la industria.

En la revisión se identificaron numerosas herramientas y metodologías para apoyar procesos de eficiencia energética desarrolladas bajo principios *Lean*. No obstante, se encontró que en general las herramientas no atienden de manera integral a un ciclo completo de mejoramiento continuo como el involucrado en un sistema de gestión. Por ello, se planteó una caracterización de los resultados encontrados en función de los componentes de un sistema de gestión de la energía, de manera que se pudiera identificar qué aspectos específicos de un proceso de implementación pueden apoyarse desde la filosofía *Lean*.

En particular, se contrastó cada uno de los requisitos de la norma ISO 50001 con las herramientas identificadas, encontrando que estas apoyan mayoritariamente los requisitos de planificación energética, control operacional y seguimiento medición y análisis. La sección de resultados indica las herramientas relacionadas con cada uno de estos requisitos.

Además de representar una guía de herramientas para las empresas que quieran iniciar la implementación de un SGE, los resultados permiten evidenciar que el área de gestión de la energía tiene componentes que no son abarcados por el pensamiento *Lean*. Aunque es clara la relación entre ambos aspectos por compartir principios esenciales, un sistema de gestión de la energía tiene mayores herramientas para involucrar a la organización completa en la mejora del desempeño energético, potenciando los resultados que pueden obtenerse. Esto se evidencia por ejemplo en el hecho de que las herramientas encontradas no abarcan aspectos como la comunicación, el diseño o las compras bajo criterios de eficiencia. La reducción de desperdicios energéticos es una parte de un sistema de gestión de la energía, pero sus componentes permiten explorar muchas otras opciones para mejorar la productividad y competitividad desde el incremento del desempeño energético, que incluso podrían proyectarse a actores de interés externos.

Por último debe resaltarse que el análisis de sistemas de gestión de la energía desde filosofías de la producción, abre un amplio campo de aplicación, que no puede satisfacerse únicamente con extrapolar conclusiones de estudios que se han realizado para tratar otros tipos de sistemas de gestión, como el ambiental.

REFERENCIAS

- Abdelaziz, E. A., Saidur, R., & Mekhilef, S. (2011). A review on energy saving strategies in industrial sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 150–168. doi:10.1016/j.rser.2010.09.003
- Abels, B., Sever, F., Kissock, K., & Ayele, D. (2011). Understanding Industrial Energy Use Through Lean Energy Analysis. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 4(1), 495–504. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-79959570997&partnerID=40&md5=9394a4c15a505806260edfdf6b2f0b19>
- Allen, P. J. (2006). Disney's enterprise energy management systems. In *World Energy Engineering Congress 2006, WEEC 2006* (pp. 209–220). Reedy Creek Energy Services, Walt Disney World Co., United States. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84865490366&partnerID=40&md5=c11ba7d518193b877b813408f4e6b017>
- Aman, S., Simmhan, Y., & Prasanna, V. K. (2013). Energy management systems: state of the art and emerging trends. *IEEE Communications Magazine*, 51(1), 114–119. doi:10.1109/MCOM.2013.6400447
- Ates, S. A., & Durakbasa, N. M. (2012). Evaluation of corporate energy management practices of energy intensive industries in Turkey. *Energy*, 45(1), 81–91. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84865413994&partnerID=40&md5=ff460948fef4ca6186449a442e751759>
- Böttcher, C., & Müller, M. (2014). Insights on the impact of energy management systems on carbon and corporate performance. An empirical analysis with data from German automotive suppliers. *Journal of Cleaner Production*. doi:10.1016/j.jclepro.2014.06.013
- Bunse, K., Vodicka, M., Schönsleben, P., Brühlhart, M., & Ernst, F. O. (2011). Integrating energy efficiency performance in production management – gap analysis between industrial needs and scientific literature. *Journal of Cleaner Production*, 19(6-7), 667–679. doi:10.1016/j.jclepro.2010.11.011
- Cabral, I., Grilo, A., Puga-Leal, R., & Cruz-Machado, V. (2011). An information model in lean, agile, resilient and green supply chains. In *2011 IEEE 3rd International Conference on Communication Software and Networks* (pp. 776–780). IEEE. doi:10.1109/ICCSN.2011.6015004
- Campos, J. C. (2008). El MGIE, un modelo de gestión energética para el sector productivo nacional. *El Hombre Y La Máquina*, (30), 18–31.
- Campos, J. C., & Lora, E. (2009). *Manual de mantenimiento centrado en la eficiencia energética para sistemas industriales* (p. 150). Barranquilla: Editorial Universidad del Atlántico.
- Carretero Peña, A., & García Sánchez, J. M. (2012). *Gestión de la eficiencia energética: cálculo del consumo, indicadores y mejora*. España: AENOR - Asociación Española de Normalización y Certificación. Retrieved from <http://site.ebrary.com/lib/unalbogsp/docDetail.action?docID=10637550>
- Chiu, T.-Y., Lo, S.-L., & Tsai, Y.-Y. (2012). Establishing an Integration-Energy-Practice Model for Improving Energy Performance Indicators in ISO 50001 Energy Management Systems. *Energies*, 5(12), 5324–5339. doi:10.3390/en5125324

- DIN. (2014). *ISO 50001 certified organizations*. Deutsches Institut für Normung. Retrieved August 01, 2014, from http://www.nagus.din.de/sixcms_upload/media/2612/2014-05-30_Certified_Organizations ISO 50001.175982.pdf
- Dües, C. M., Tan, K. H., & Lim, M. (2013). Green as the new Lean: how to use Lean practices as a catalyst to greening your supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 40, 93–100. doi:10.1016/j.jclepro.2011.12.023
- Eidt, B. D. (2012). Global energy management system. In *Society of Petroleum Engineers - Carbon Management Technology Conference 2012* (Vol. 1, pp. 403–411). ExxonMobil, United States: Society of Petroleum Engineers. doi:10.7122/151218-MS
- González, A. J., Castrillón, R., Quispe, E. C., Investigación, G. De, Occidente, U. A. De, Gonzalez, A. J., & Castrillón, R. (2012). ENERGY EFFICIENCY IMPROVEMENT IN THE CEMENT INDUSTRY By: *IEEE Cement Industry Technical Conference (Paper)*, 1–13. doi:10.1109/CITCON.2012.6215688
- Gopalakrishnan, B., Mardikar, Y., Gupta, D., Jalali, S., & Chaudhari, S. (2012). Establishing baseline electrical energy consumption in wood processing sawmills for lean energy initiatives: A model based on energy analysis and diagnostics. *Energy Engineering: Journal of the Association of Energy Engineering*, 109(5), 40–80. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84864131170&partnerID=40&md5=aa3273bc3728f063524ff69a09b95071>
- Gorp, V., & Van Gorp, J. C. (2004). Maximizing energy savings with enterprise energy management systems. *Pulp and Paper Industry Technical Conference, 2004. Conference Record of the 2004 Annual*, 175–181. doi:10.1109/PAPCON.2004.1338378
- Holweg, M. (2007). The genealogy of lean production. *Journal of Operations Management*, 25(2), 420–437. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-33847417402&partnerID=40&md5=541404c4d12c15dcd893941f595b8482>
- ICONTEC. (2011). NTC-ISO 50001, Sistemas de Gestión de la Energía, Requisitos con orientación para su uso. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).
- Keskin, C., & Kayakutlu, G. (2012). Value stream maps for industrial energy efficiency. In *2012 Proceedings of Portland International Center for Management of Engineering and Technology: Technology Management for Emerging Technologies, PICMET'12* (pp. 2824–2831). Istanbul Technical University, Energy Institute, Turkey. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84867924413&partnerID=40&md5=af8971d81f39952e2c89a2ba79159345>
- Khalaf, M. A., Labib, A. A., & ElSayed, A. E. (2011). An investigation into the relationship between the implementation of lean manufacturing and energy efficiency in industrial organizations. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(12), 1886–1896. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84856498059&partnerID=40&md5=c0a0226b2f07044c4f4b51cbad4c0732>
- King, A. A., & Lenox, M. J. (2009). Lean and green? An empirical examination of the relationship between lean production and environmental performance. *Production and Operations Management*, 10(3), 244–256. doi:10.1111/j.1937-5956.2001.tb00373.x
- La Bruna, E., & Zafred, G. (2011). Preparing your company for the future energy management systems requirements like ISO 50001. In *AISTech 2011 Iron and Steel Technology Conference* (pp. 929–929). Indianapolis, IN; United States.
- Mahjoub, A. H., & Dandachi, N. H. (2007). Power Systems Monitoring & Control Centers Sharing SCADA/EMS Information in the Age of Enterprise Mobility. In *2007 Innovations in Information Technologies (IIT)* (pp. 312–316). IEEE. doi:10.1109/IIT.2007.4430462
- Miller, G., Pawloski, J., & Standridge, C. (2010). A case study of lean, sustainable manufacturing. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 3(1), 11–32. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-79951858971&partnerID=40&md5=2c6ef19be3a8dbd5e7d501f76b3ef0d0>
- O'Callaghan, P. W., & Probert, S. D. (1977). Energy management. *Applied Energy*, 3(2), 127–138. doi:10.1016/0306-2619(77)90024-1
- Oppenheim, B. W. (2006). Impact of Productivity on Energy Conservation. *Strategic Planning for Energy and the Environment*, 26(3), 48–65. doi:10.1080/10485230609509716
- Oppenheim, B. W. (2006). Impact of productivity on energy conservation. *Strategic Planning for Energy and the Environment*, 26(3), 48–65. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-33751435422&partnerID=40&md5=9d9111bdd4b6d9e8a121f8ed14f2d93a>
- Ottermann, E. W. (2011). Energy management challenges and opportunities in the South African cement industry. *Industrial and Commercial Use of Energy (ICUE), 2011 Proceedings of the 8th Conference on*.
- Paju, M., Heilala, J., Hentula, M., Heikkila, A., Johansson, B., Leong, S., & Lyons, K. (2010). Framework and indicators for a Sustainable Manufacturing Mapping methodology. *Simulation Conference (WSC), Proceedings of the 2010 Winter*. doi:10.1109/WSC.2010.5679031
- Peng, W. (2010). Reducing carbon emissions in precast concrete production through the lean production philosophy. *Responsive Manufacturing - Green Manufacturing (ICRM 2010), 5th International Conference on*. doi:10.1049/cp.2010.0448
- PEN-SGIE. (2013). *Programa estratégico para la innovación en la gestión empresarial, mediante la asimilación, difusión y generación de nuevos conocimientos en gestión energética y nuevas tecnologías e implementación del Sistema de Gestión Integral de la Energía en empresas*. Bogotá.

- Prías, O. (2006). *Gestión Estratégica Integral de la Eficiencia Energética en Ambientes Competitivos*. Universidad de Cienfuegos Carlos Rafael Rodríguez.
- Puvanasvaran, P. (2012). Lean principles adoption in environmental management system (EMS): A survey on ISO 14001 certified companies in Malaysia. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 5(2), 406–430. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84872008474&partnerID=40&md5=a52f14c200fc aa46618a1e2fae156330>
- Ranky, P. G., & Tag, I. S. O. (2012). Sustainable energy management and quality process models based on ISO 50001:2011 the International Energy Management Standard. *Sustainable Systems and Technology (ISSST), 2012 IEEE International Symposium on*, 1–6. doi:10.1109/ISSST.2012.6227995
- Ritchie, R., & Angelis, J. (2010). Implementing lean into a servicing environment. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*. Warwick Business School, University of Warwick, Coventry, CV4 7AL, United Kingdom. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-78649969875&partnerID=40&md5=5=8ac2f75b81da53c70a3f6d479867bcbf>
- Rudberg, M., Waldemarsson, M., & Lideström, H. (2013). Strategic perspectives on energy management: A case study in the process industry. *Applied Energy*, 104, 487–496. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84871885258&partnerID=40&md5=36b31b5da9a 4f8162addbfcd25dc692>
- Russell, C. (2007). WORLD-CLASS ENERGY ASSESSMENTS: Industrial Action Plans for Greater and More Durable Energy Cost Control. In *Twenty-ninth Industrial Energy Technology Conference* (p. 10).
- Scheihing, P. E., Almaguer, J. A., Pamela, B., Reyes, D. L., Fisher-evans, T. E., De Los Reyes, P. B., ... Meffert, W. A. (2013). Superior Energy Performance : A Roadmap for Continual Improvement in Energy Efficiency. *Strategic Planning for Energy and the Environment*, 3(March), 37–41. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84865580316&partnerID=40&md5=2e96c2c 620c09cb6757ca81428764adc>
- Sciortino, M., & Watson, S. (2009). The Importance of Energy Efficiency in Lean Manufacturing : Declaring Energy the Ninth Waste. *ACEEE Summary Study on Energy Efficiency in Industry*, American C(American Council for an Energy Efficient Economy, 2009), 3–133.
- Seryak, J., & Kissock, K. (2005). Lean energy analysis: Guiding industrial energy reduction efforts to the theoretical minimum energy use. In *Proceedings ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry* (pp. 1–154). Energy and Resource Solutions, Inc. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-31844449403&partnerID=40&md5=0b6bff8603fbe161b98 ba53ebf20940>
- Seryak, J., Solutions, R., & Kissock, K. (2005). Lean energy analysis: Guiding industrial energy reduction efforts to the theoretical minimum energy use. In *Proceedings ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry* (Vol. 2015, pp. 1–154). Energy and Resource Solutions, Inc. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-31844449403&partnerID=40&md5=0b6bff8603fbe161b98 ba53ebf20940>
- Sheng, T. L., & Tofoya, J. (2010). The secret of manufacturing excellence: Lean maintenance. *Semiconductor Manufacturing (ISSM), 2010 International Symposium on*, 1–4.
- Suganthi, L., & Samuel, A. A. (2012). Energy models for demand forecasting—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(2), 1223–1240. doi:10.1016/j.rser.2011.08.014
- Swords, B., Coyle, E., & Norton, B. (2008). An enterprise energy-information system. *Applied Energy*, 85(1), 61–69. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-3484846568&partnerID=40&md5=730b5ba2e75b7f565e7f 92a55064d506>
- UPME. (2007). *Sistema de Gestión Integral de la Energía Guía de Implementación*. (U. de P. M. E. UPME., Ed.). Bogotá.
- Van Gorp, J. C. (2005). Using key performance indicators to manage energy costs. *Strategic Planning for Energy and the Environment*, 25(2), 9–25. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-28444452644&partnerID=40&md5=904db733299d3fa6c7b9cf0e7f82d05b>
- Wang, X., Wang, Y., & Xu, D. (2012). Lean six sigma implementation in equipment maintenance process. In *2012 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering* (pp. 1391–1395). IEEE. doi:10.1109/ICQR2MSE.2012.6246481
- Wessels, A. (2011). Energy management system implementation at Toyota SA. In *Industrial and Commercial Use of Energy (ICUE)* (pp. 40–45).
- Wu, H. (2009). The lean manufacture research in environment of the supply chain of modern industry engineering. In *2009 16th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management* (pp. 297–300). IEEE. doi:10.1109/ICIEEM.2009.5344586
- Yoshino, M., Nishibe, N., Oba, M., & Komoda, N. (2010). Classification of energy-saving operations from the perspective of system management. *Industrial Informatics (INDIN), 2010 8th IEEE International Conference on*. doi:10.1109/INDIN.2010.5549663
- Zhao, D., Ye, W., & Gao, C. (2012). Research on process optimization for equipment maintenance based on lean six sigma management. In *2012 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering* (pp. 1333–1337). IEEE. doi:10.1109/ICQR2MSE.2012.6246467

Modelo estratégico de innovación para impulsar la gestión energética en Colombia

Strategic Innovation Model to Boost the Energy Management in Colombia

Omar Prias C.^{a*}, Diana Montaña S.^a

RESUMEN

Desde hace una década se ha venido trabajando en el desarrollo e implementación de un modelo estratégico de innovación, desde la academia, en donde confluyen tanto la industria como el estado que ha contribuido en la creación de nuevas herramientas en gestión energética y a la asimilación y toma de conciencia de las empresas en un entorno propicio desarrollado por el estado que brinde el respaldo para el fomento de programas y proyectos encaminados a impulsar la gestión energética en Colombia. El modelo estratégico de innovación se implementa en el desarrollo del Programa Estratégico Nacional - Sistemas Gestión Integral de la Energía gracias a la participación del estado representado por Colciencias y la UPME, la academia como ente integrador ejecutando el programa, la empresa representada por los clientes de empresas de servicios públicos.

La característica innovadora fundamental del programa se basa en la sistematización, selección, organización y divulgación del conocimiento y el desarrollo e introducción a nivel empresarial de herramientas que permitan un nuevo concepto en la forma de administrar los recursos energéticos a través de los sistemas de gestión integral de la energía.

PALABRAS CLAVE

Gestión energética; innovación; sistema de gestión integral de la energía; universidad-empresa-estado.

ABSTRACT

Since a few years back, there has been some work towards the implementation of a strategic innovation model, encouraged from the academy, which contribute to the creation of new tools in energy management and the assimilation and awareness in the companies by a suitable environment developed by the government which gives the backrest to the foment of programs and projects aimed to boost the energy management in Colombia.

The model is implemented in the development of the Programa Estratégico Nacional - Sistemas Gestión Integral de la Energía, thanks to the government participation, represented by Colciencias and UPME. The academy, as an integrative organization. The company was linked as a beneficiary sector.

The main innovative characteristic of the program is based on the systematization, selection, organization and disclosure of the knowledge and the development and introduction, in a company-level, of tools that allow a new concept in the way of manage the energy resources through the integral energy management systems

KEYWORDS

Energy management; innovation; integral energy management systems, University-Company- Government.

Recibido: agosto 30 de 2014
Recibido con revisión: septiembre 3 de 2014
Aceptado: septiembre 27 de 2014

^{a*}Universidad Nacional de Colombia
Sede Bogotá,
Facultad de Ingeniería
Cra 30 N° 45-00 ed:411 of: 203 B
Bogotá, Colombia
Tel.: + (57) 3165000 ext:11145
ofpriasc@unal.edu.co

Energética 44, diciembre (2014), pp.61-68

ISSN 0120-9833 (impreso)
ISSN 2357 - 612X (en línea)
www.revistas.unal.edu.co/energetica
© Derechos Patrimoniales
Universidad Nacional de Colombia



1. INTRODUCCIÓN

La eficiencia energética en el contexto de la competitividad, los impactos ocasionados por el cambio climático y las expectativas del mejoramiento de la calidad de vida de las personas, se convierte en una estrategia más amplia en donde confluyen diferentes visiones y enfoques desde las políticas, los programas y las acciones en una configuración multidimensional [Prías, 2006].

El artículo muestra el fortalecimiento de la academia, el estado y la industria en temas de eficiencia energética, mediante la creación de un modelo de innovación que se ha venido desarrollando por más de 8 años y que se gestó gracias a la ley 697 en el 2001 la cual establece el programa de uso racional y eficiente de energía y fuentes no convencionales en Colombia.

Luego de la reglamentación de la ley 697 de 2001 [UPME, 2007], se crea la Red Colombiana de Investigación en Eficiencia Energética RECIEE compuesta por 13 grupos que inicio actividades hace alrededor de 8 años con el respaldo del Programa de Energía y Minería de Colciencias. En el marco de la Red se realizaron congresos internacionales en donde se presentaron los resultados de proyectos de investigación, como el relacionado con el sistema de gestión integral de energía que dio origen a una línea de innovación con impacto en el sector productivo en un programa estratégico nacional que ha contribuido a llevar al país al estado del arte mundial en temas de gestión [RECIEE, 2003].

Como resultado de proyectos de investigación e innovación cofinanciados por la UPME y COLCIENCIAS y ejecutados por grupos de investigación en eficiencia energética y expertos nacionales, se dispone de herramientas pedagógicas y de un Sistema de Gestión Integral de Energía que recoge experiencias y propuestas de modelos de gestión energética desarrollados en Colombia, Cuba y referentes de la Unión Europea y Estados Unidos, logrando así la integración de diferentes enfoques y herramientas adaptados a la situación actual de los sistemas gerenciales en el país.

El Modelo de Gestión Integral de la Energía para el Sector Productivo se obtiene del resultado del “Programa de Gestión Integral de la Energía para el Sector Productivo Nacional” financiado por la UPME y Colciencias durante los años 2006-2007, y desarrollado por los Grupos de Investigación en Gestión Eficiente de la Energía, Kaí, de la Universidad del Atlántico y el Grupo de Investigación en Energía, GIEN, de la Universidad Autónoma del Occidente en coordinación con Omar Prias como investigador independiente [Campos, 2008].

Este trabajo demostró los principales elementos de gestión que obstaculizan el desarrollo continuo de una cultura energética al nivel empresarial en Colombia.

Así mismo mostró, que trabajando sobre esos aspectos se pueden obtener altos potenciales de ahorros e incremento de la productividad y competitividad, descubriendo campos de acción nunca abordados y modelos sostenibles de innovación que promuevan la gestión energética en Colombia.

2. MODELO ESTRATÉGICO DE INNOVACIÓN PARA IMPULSAR LA GESTIÓN ENERGÉTICA EN COLOMBIA

El modelo planteado integra a la universidad, a la empresa y al estado figura 1 en un esquema de mejoramiento y fortalecimiento de capacidades y transferencia del conocimiento para impulsar la gestión energética en Colombia.



Figura 1: Modelo Universidad Empresa Estado
Fuente. Elaboración propia

La universidad responde como ente integrador del modelo, fortaleciendo las capacidades en formación y capacitación generando nuevas herramientas de gestión y contenidos académicos en gestión energética con un enfoque gerencial. La universidad respalda al estado en la ejecución de las políticas y planes mediante la transmisión del conocimiento adquirido durante su investigación.

El modelo plantea la búsqueda de nuevas herramientas en gestión energética respondiendo a las necesidades de la industria, es así como permite difundir el conocimiento adquirido por las universidades a través de programas que logren la interacción con el sector productivo, realizando una sinergia que pueda fortalecer y generar un proceso de mejora continua.

Cada entidad responderá dentro de la dinámica del modelo con aportes al mismo para generar nuevas herramientas que fortalezcan la innovación en gestión energética del país.

Es ahí donde la formación de gestores energéticos es importante en el desarrollo de la estrategia de innovación, debido a que son ellos quienes lo transmitirán y retroalimentaran basados en la experiencia adquirida en la industria.

Las universidades desarrollaran diferentes modalidades de aprendizaje para el tema de gestión energética, generando no solo una capacidad instalada de personal, sino sensibilizando y fundando la toma de conciencia sobre el sistema de gestión de la energía.

La industria mediante la absorción de conocimiento establecerá una cultura entorno a la gestión energética, a la gestión de la producción, del mantenimiento, del recurso humano, la gestión de compras, la gestión ambiental y la gestión tecnológica, no obstante la industria deberá retroalimentar, junto con la academia, las herramientas de gestión y proporcionara los indicadores que reflejen el comportamiento de la empresa, de la situación de la eficiencia energética y de sus costos energéticos en el ámbito del sector productivo al que pertenece, contribuyendo a conocer el estado del sector.

Por su parte el estado deberá propiciar el escenario de políticas y estímulos para la innovación facilitando el encuentro entre la empresa y la universidad que permita un cambio de la cultura energética del sector productivo a partir de una reforma en el gerenciamiento de la energía a nivel de empresa y grupos empresariales que se traduce en reducción de los consumos de energía y del impacto ambiental mejorando el indicador nacional de intensidad energética.

Por último el estado normalizará la gestión energética a nivel nacional sin mecanismos impositivos, a través de la demostración de resultados y actualización y perfeccionamiento continuo de la tecnología de gestión energética propuesta.

Para abordar la estrategia se necesita que confluyan actividades propias de cada elemento del modelo. Para el caso del estado se debe disponer de herramientas que propicien la interacción entre la industria y la academia, que incentiven la participación y genere indicadores para la caracterización y seguimiento de los sectores industriales que retroalimenten el modelo.

En los últimos años el estado ha formulado políticas que generan un ambiente propicio para impulsar la gestión energética en el país, es el caso de la ley 697 de 2001 la cual fomenta el uso racional y eficiente de la energía como un asunto de interés social, público y de conveniencia nacional, promoviendo los proyecto de Uso Racional de Energía y la creación del PROURE [Minminas, 2001].

Para el 2012 el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, genera mecanismos para exclusión de IVA y deducción de renta para elementos y equipos que se destinan a la disminución del consumo de energía estas reducción se basa en las metas del PROURE donde la UPME se encarga del concepto técnico.

Entre los equipos más importantes en disminución de consumo de energía se encuentran los motores de alta eficiencia y el aprovechamiento de calor residual como las más pertinentes para optar a dichos beneficios Las otras categorías aplicables son transporte masivo, uso del tren, transporte limpio y proyectos demostrativos o de medición de Fuentes no Convencionales de energía.

De igual forma el estado ha incluido dentro de sus prioridades el fomento y estímulo al desarrollo científico, tecnológico y a la innovación, reconociéndolos como un requisito fundamental para lograr una sociedad eficiente y competitiva. La legislación

tributaria colombiana contempla diferentes beneficios que incentivan las actividades de innovación [COLCIENCIAS, 2013].

En el caso de las universidades estas consolidaran capacidades mediante la investigación de nuevos temas relacionados con gestión de la energía. Estas capacidades adquiridas servirán para preparar a los formadores y así generar un recurso dentro de los centros de educación que fomente y transmita mediante cursos teórico prácticos, conferencias, programas de sensibilización y diplomados las herramientas generadas dentro de la investigación realizada por la academia al sector productivo.

También será necesario que la estrategia por parte de las universidades contemple la transmisión del conocimiento generado mediante la divulgación de este por medios como revistas, boletines, libros, informes de caracterización, entre otros.

Este escenario brinda a la industria un respaldo para el fomento de proyectos piloto y de programas que promuevan la Integración del diagnóstico energético a la estructura, organización, planeación, régimen, tecnología, control de procesos y competencia operacional y que eleven significativamente la cultura energética del personal clave de la empresa.

3. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO PARA EL DESARROLLO DE LAS CAPACIDADES I+D+i

Muestra de esta interacción Universidad-Empresa-Estado es el desarrollo del “Programa estratégico para la innovación en la gestión empresarial, mediante la asimilación, difusión y generación de nuevos conocimientos en gestión energética y nuevas tecnologías e implementación del Sistema de Gestión Integral de la Energía en empresas de cinco regiones del país” de gran impacto nacional. Figura 2

El Programa Estratégico Nacional-Sistemas de Gestión Integral de la Energía PEN-SGIE se diseñó y ejecutó bajo el modelo estratégico de innovación, alineado con la ley de ciencia y tecnología colombiana, buscando impactar transversalmente en sectores estratégicos en las regiones de Antioquia, Atlántico, Bogotá D.C, Santander y Valle del Cauca.

La característica innovadora fundamental del programa se basa en la sistematización, selección, organización y divulgación del conocimiento y el desarrollo e introducción a nivel empresarial de herramientas que permitan un nuevo concepto en la forma de administrar los recursos energéticos a través de los sistemas de gestión integral de la energía, que permitirán superar los

tradicionales problemas de las acciones o programas que no logran cambios de hábitos gerenciales, productivos y de gestión tecnológica que impacten la productividad y competitividad de la empresa [PEN-SGIE, 2013].



Figura 2: Modelo estratégico de innovación desarrollado por el PEN-SGIE
Fuente. Elaboración propia.

El PEN-SGIE dando respuesta al modelo de innovación propuesto ha desarrollado mediante la primera etapa del programa la creación y consolidación de capacidades académicas permanentes en gestión energética y nuevas tecnologías en instituciones de educación superior para la formación de agentes multiplicadores y capacitación de gestores empresariales en el Sistema de Gestión Integral de la Energía SGIE.

Esta primera etapa del programa consta de dos actividades principales: La actividad de formación de formadores figura 3. que consistió en la capacitación, a través de un curso certificado, a los formadores de cada región, donde se divulgaron los documentos y herramientas desarrollados en programas financiados por UPME y Colciencias en el campo de la eficiencia energética entre los años 2005 y 2007. Los formadores fueron profesores o investigadores de las universidades cuyos grupos de investigación pertenecen a la Red Colombiana de Investigación en Eficiencia Energética [RECIEE, 2003].

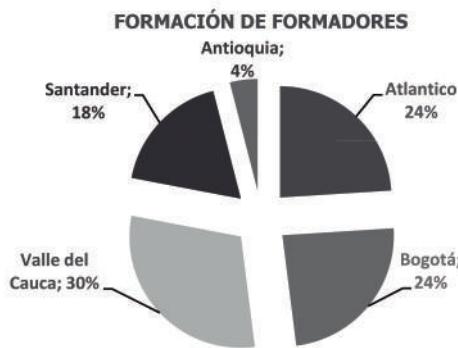


Figura 3: Formadores formados de cada región.
Fuente. Elaboración propia.

En noviembre de 2003 se constituyó una RED DE EFICIENCIA ENERGETICA con 15 grupos de investigación algunos de ellos con trayectoria y

excelencia con el objetivo de Identificar líneas de investigación y coordinar actividades para su fomento y desarrollo e intercambio de experiencias, impulsando y coordinando la formación avanzada. Maestrías y doctorados, apoyando la movilidad de investigadores y participando en redes internacionales para gestionar la creación de publicaciones indexadas, de igual forma coordino la creación de normas y reglamentos técnicos sobre eficiencia energética para equipos de uso final y gestión energética, promover la creación de incentivos a las investigaciones.

La actividad de formación de gestores energéticos se desarrolló mediante cursos de capacitación en cada región, orientado por los formadores de cada universidad, para multiplicar el conocimiento adquirido en los cursos de formación de formadores. Las cifras de la capacitación impartida por parte del programa, se muestran en la tabla 1.

Resultados Nacionales	
Gestores Energéticos Avanzados	244
Gestores Energéticos Básicos	199
Auditores Internos ISO 50001	139
Gerentes y representantes de industria sensibilizados	470

Tabla 1: Formación y capacitación a nivel nacional
Fuente. Elaboración PEN-SGIE

Actualmente existen 9 programas de Doctorado en Química, Eléctrica, Materiales, Energía y Termodinámica, Física, y 10 programas de Maestría en Sistemas Energéticos, Mecánica, Eléctrica, Química que por su naturaleza se constituyen en soporte de conocimiento de alto nivel académico para el desarrollo del programa; como también existen laboratorios e infraestructura en las Universidades [PEN-SGIE, 2013].

Existen también 2 programas de especialización y 1 diplomado en eficiencia energética que se han mantenido vigentes durante los últimos 5 años y satisfacen los requerimientos en formación de ingenieros recién egresados y en mayor proporción de ingenieros de la industria de la región de influencia.

Actualmente se está despertando el interés de ingenieros de diferentes áreas figura 4. en programas de formación de alto nivel en el exterior, específicamente en doctorados en eficiencia energética en Europa, lo cual permite en mediano plazo generar nuevas líneas de profundización o programas específicos liderados por estos profesionales.

Uno de los principios del SGIE es que la gestión de la energía debe involucrar a todas las áreas de una organización figura 5. Desde este punto de vista, aunque se ha logrado fomentar la diversificación de las funciones relevantes para el mejoramiento del desempeño energético en distintas áreas de las empresas, aún existe el reto de

definir mejor el rol que cada disciplina juega en el establecimiento de los SGIE y las herramientas específicas que requieren para su contribución al mejoramiento continuo del sistema [PEN-SGIE, 2013].



Figura 4: Perfil profesional de los gestores energéticos formados.
Fuente. Elaboración PEN-SGIE



Figura 5: Áreas de la empresa donde se desempeñan los gestores formados.
Fuente. Elaboración PEN-SGIE

A pesar de las barreras mencionadas, se ha identificado que la formación ha servido para mejorar de forma significativa la cultura en las empresas, ya que se cuenta con personal capacitado dentro de las compañías, ayudando al mejoramiento del desempeño energético en las industrias figura 6.

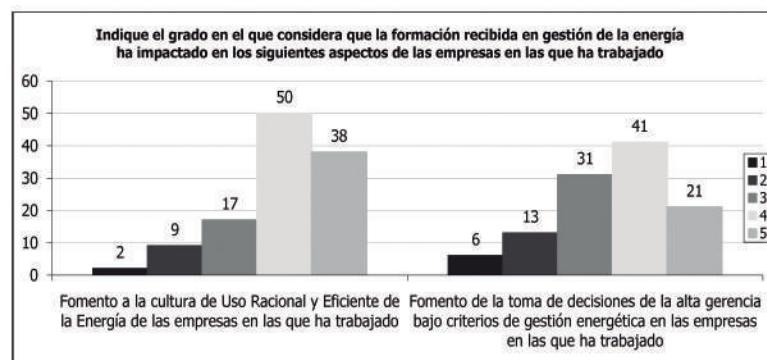


Figura 6: Gestión de impacto de la formación recibida
Fuente. Elaboración PEN-SGIE

En cuanto al papel que juega la industria en el modelo el PEN-SGIE se desarrolló una etapa de implementación del sistema de gestión integral de la energía en clientes de las empresas cofinanciadoras, estas empresas presentan una amplia diversidad abarcando el sector industrial y deservicios. A través de ellas, se generaron impactos reales en competitividad. Además de ser beneficiarias de los proyectos de capacitación, sensibilización, caracterización e implementación, las empresas demostraron su compromiso mediante la adopción de iniciativas para la medición energética y la ejecución de proyectos de mejora, financiadas con capital propio [PEN-SGIE, 2013].

La etapa de implementación del SGIE en las industrias debe cumplir tres fases ininterrumpidas de organización e implementación: Decisión Estratégica, Instalación y Operación figura 7.



Figura 7: Etapa de implementación de un SGIE
Fuente. Elaboración PEN-SGIE

La necesidad de desarrollar tres etapas consiste en que generalmente la empresa no está preparada cultural, técnica y organizativamente para comenzar la operación del SGIE, sino que necesita de actividades preparatorias que se realizan una sola vez. Entre estas actividades se encuentran organizar las estructuras, obtener los modelos, lograr la alineación organizacional del personal y otras que se describen más detalladamente en los informes de caracterización [Bolivariana, 2006].

La etapa Decisión Estratégica constituye la prueba de necesidad en la empresa de la implementación del

Sistema de Gestión Integral de la Energía y es donde se logra el compromiso de la alta dirección a destinar recursos humanos y materiales y realizar el cambio organizacional requerido, convencida de que la recuperación de los potenciales de reducción de costos identificados permiten superar con creces la inversión a realizar, impactando la productividad y la competitividad de la empresa.

Este primer paso para la implementación de los Sistemas de Gestión Integrales de la Energía es el más difícil e importante, debido a que es el responsable del cambio en el pensamiento gerencial sobre la administración de sus recursos energéticos, así como de la organización de esta administración al interior de su empresa.

La implementación de esta etapa en los diferentes sectores productivos del país tiene un carácter estratégico por cuanto es la base para conocer como orientar el marco regulatorio y legal existente hacia la toma de decisiones a nivel empresarial que la favorezcan. Así mismo tiene un carácter táctico para lograr una metodología, guía práctica y norma generalizada que motive la gestión integral hacia el uso eficiente de la energía [PEN-SGIE, 2013].

En el marco del PEN-SGIE, la variedad y diversidad de empresas beneficiadas resulta representativa figura 8., logrando un cubrimiento de sectores con distintos potenciales de crecimiento y capacidad de posicionamiento.

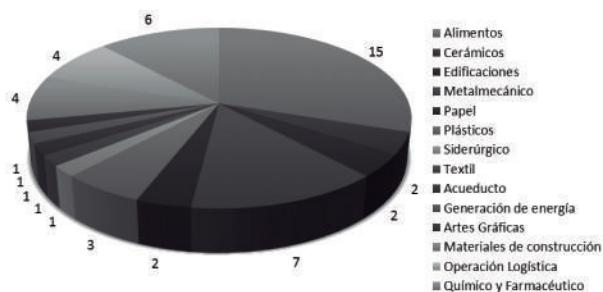


Figura 8: Distribución por sectores de las empresas beneficiarias del programa

Fuente. Elaboración PEN-SGIE

La metodología empleada por el PEN-SGIE en la caracterización de las empresas beneficiarias permitió estimar potenciales de ahorro no asociados a la producción y potenciales asociados a cambios tecnológicos Tabla 2. En la primera categoría se encuentran prácticas como disminuir el tiempo en vacío de equipos, cambiar esquemas de producción para impactar el consumo o la adopción de programas de mantenimiento centrados en eficiencia energética. La segunda categoría incluye prácticas como sustitución de equipos por otros más eficientes, repotenciación tecnológica o el diseño de

nuevos procesos productivos con criterios de eficiencia energética Los potenciales estimados a nivel nacional, se clasificaron en asociados a energía eléctrica y asociados a energía térmica, categoría que incluía los usos finales relacionados con carbón y gas natural como energéticos primarios.

Región	Eléctrico		Térmico		Total Eléc.	Total Térn.
	No asociado s a la producci ón	Cambio tecnol ógico	No asociado s a la producci ón	Cambio tecnol ógico		
Atlántico	25%	11%	18%	ND	35%	18%
Santander	5%	8%	8%	ND	13%	8%
Valle	4%	7%	12%	8%	11%	20%
Antioquia	10%	25%	6%	15%	35%	21%
Bogotá D.C	5%	11%	7%	6%	16%	13%

Tabla 2: Resumen de potenciales de ahorro por región

Fuente. Elaboración PEN-SGIE

El análisis de los resultados obtenidos muestra que el porcentaje esperado de ahorros de energía eléctrica asociados a gestión para una organización, puede estar entre el 5% y el 15% sobre el consumo eléctrico inicial de la empresa, con el 80% de las empresas del programa ubicándose en este rango. Por otro lado, se observa que el ahorro esperado por cambios se acerca a un 8% o al 25% según el estado tecnológico de las empresas [PEN-SGIE, 2013].

El seguimiento a los impactos del PEN-SGIE en la industria mediante una encuesta realizada a las empresas que hicieron parte del programa, permitió determinar que en todos los casos, las empresas valoraron las nuevas herramientas técnicas adquiridas por el personal para gestión de la energía. Por otro lado, un porcentaje mayor al 90% de las empresas, considera que las actividades han contribuido al fomento de la creación de una conciencia de uso racional y eficiente de la energía y un 67% de las empresas considera que el personal adquirió nuevas herramientas organizacionales para la mejora del desempeño energético Figura 9.



Figura 9: Impactos de la difusión del PEN-SGIE a la industria

Fuente. Elaboración PEN-SGIE

Sobre la implementación de las recomendaciones, es de destacar que en la mayoría de categorías las empresas manifestaron que han implementado o planean implementar las recomendaciones sugeridas en la etapa de caracterización Figura 10.



Figura 10: Implementación de recomendaciones de la etapa de caracterización

Fuente. Elaboración PEN-SGIE

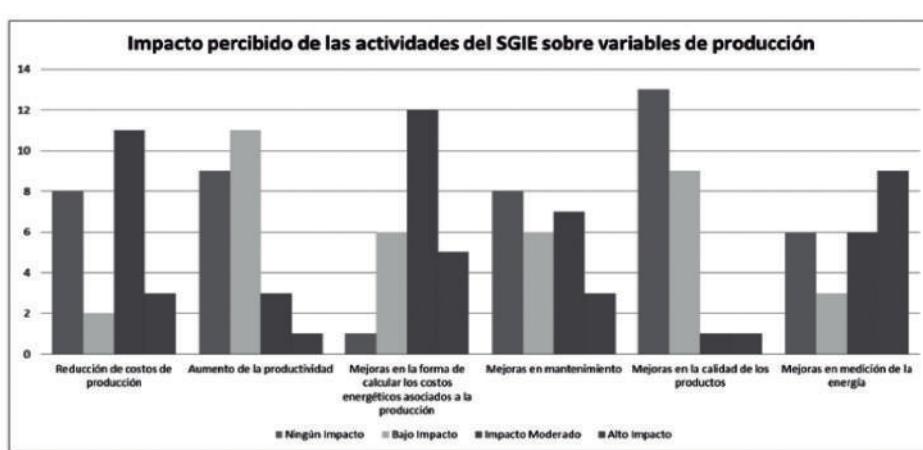


Figura 11: Impacto de las actividades del PEN-SGIE en factores relacionados con procesos productivos

Fuente. Elaboración PEN-SGIE

En cuanto a los impactos percibidos sobre los procesos productivos, llama la atención que las empresas consideran que las actividades desarrolladas por el programa han tenido bajos impactos en la productividad y solo resalta el impacto sobre una mejor estimación de costos energéticos asociados a la producción Figura 11. Además de los proyectos centrales, el programa realizó otras actividades que contribuyeron al acercamiento entre la universidad y la industria y a la promoción de la gestión de la energía en sectores estratégicos gracias al desarrollo

de la estrategia de divulgación de sus investigaciones en torno a la gestión energética.

Resultado del trabajo de los investigadores se elaboró una propuesta de norma nacional sobre gestión energética que permitió a ICONTEC convocar a comité técnico para estudio

de la propuesta, posteriormente a esta propuesta el ICONTEC hace seguimiento y participa en los comités internacionales para la elaboración de la familia de ISO 50000 [ICONTEC, 2011]

Contando con la experiencia de los investigadores del programa, el trabajo de seguimiento de la familia de normas ISO 50000 realizado con ICONTEC y la experiencia de las caracterizaciones e implementaciones llevadas a cabo a nivel nacional, se desarrolló la publicación 'Implementación de un Sistema de Gestión de la Energía – Guía con Base en la norma ISO 50001'. En este documento, se explican cada uno de los requisitos de la norma ISO 50001, y se registran actividades para su cumplimiento, dando ejemplos y teniendo en cuenta las posibilidades de integración con otros sistemas de gestión [Priás, et al., 2013].

4. CONCLUSIONES

- Se demostró mediante el PEN-SGIE que con una sinergia entre la universidad empresa estado se puede crear un modelo sostenible que fomente la gestión energética en el país, generando un cambio de cultura, donde la universidad juega un papel importante como ente integrador consolidando fuertes capacidades en gestión, investigación y divulgación del sistema.
- El desarrollo de tecnologías de gestión por sí solo no constituye condición suficiente para lograr su implementación en la industria; se requiere por lo tanto de una capacidad preparada para su divulgación científica técnica y su implementación. En tal sentido, son muy importantes las herramientas desarrolladas por universidades y entidades especializadas, auspiciadas por entidades del estado, para elevar el conocimiento del sector académico, de los profesionales de servicios energéticos y personal de la industria en eficiencia energética, sin las cuales no existirían las condiciones culturales necesarias para la asimilación de nuevas tecnologías comprometiendo su efectividad y duración en el tiempo.
- La unificación y comparación de indicadores de consumo específico en función de la producción, el seguimiento de tecnologías eficientes de uso final, resultados de acciones e impactos medibles y cuantificables agregados a nivel sectorial y nacional, son algunas de las variables de interés que deben formar parte de un nuevos modelos en innovación y conocimiento para la toma de decisiones por parte de los empresarios y el estado.
- Para la industria es fundamental el desarrollo de estrategias que le permitan impactar en la productividad como consecuencia del manejo y administración de la energía en todos los procesos productivos como también de la interacción y compromiso de todas las áreas y niveles de la organización soportada por sistemas de gestión energética que se deben integrar a los sistemas ambientales y de calidad principalmente.
- En la experiencia del programa pudo observarse que, aun cuando en muchas empresas la matriz energética se sustentaba en fuentes aprovechables como energía térmica, la información respecto a los usos de estos energéticos era mucho menor a la disponible en energía eléctrica. Esta situación toma mayor relevancia si se tiene en cuenta que el balance energético nacional 2009 [UPME, 2009], calcula que únicamente el 18.7% de la energía consumida en la industria es energía eléctrica, con el resto correspondiendo a otros energéticos principalmente utilizados en procesos térmicos. Este análisis permite vislumbrar que la alineación de esfuerzos para generar capacidades de medición y uso eficiente de este tipo de energía, puede traer

unos altos beneficios para la industria, aun hoy difíciles de estimar.

- La influencia de la gestión de la energía sobre la productividad fue una de las motivaciones para la formulación del programa PEN-SGIE y por ello, este resultado invita al análisis y a la formulación de modelos para realizar seguimiento a la adopción de sistemas de gestión en función de la productividad y cuantificar la relación real existente entre ambos factores.

REFERENCIAS

- Bolivariana, U. P. (2006). *E-ure. Uso Racional de la Energía*.
- Campos, J. C. (2008). El MGIE, un modelo de gestión energética para el sector productivo nacional. *El Hombre Y La Máquina*, (30), 18–31.
- COLCIENCIAS. (2013). Guia para tramitar solicitudes para deducción por inversión o donación en proyectos de I+D.
- ICONTEC. (2011). NTC-ISO 50001, Sistemas de Gestión de la Energía, Requisitos con orientacion para su uso. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).
- Minminas. (2001). LEY 697 de 2001.
- PEN-SGIE. (2013). *Programa estratégico para la innovacion en la gestión empresarial, mediante la asimilacion, difusion y generacion de nuevos conocimientos en gestion energetica y nuevas tecnologías e implementacion del Sistema de Gestión Integral de la Energia en empresas*. Bogotá.
- Prías, O. (2006). *Gestión Estratégica Integral de la Eficiencia Energética en Ambientes Competitivos*. Universidad de Cienfuegos Carlos Rafael Rodriguez.
- Priás, O., Campos, J. C., Rojas, D., & Palencia, A. (2013). *Implementación de un Sistema de Gestión de la Energía Guía con base en la norma ISO 50001*.
- RECIEE. (2003). *Red Colombiana de Investigación en Eficiencia Energética*.
- UPME. (2007). *Sistema de Gestión Integral de la Energia Guía de Implementación*. (U. de P. M. E. UPME., Ed.). Bogotá.
- UPME. (2009). Plan Energético Nacional.

Búsqueda exhaustiva de descriptores para mejorar el desempeño de las máquinas de soporte vectorial en localización de fallas

Exhaustive Search of Input Characteristics to Improve the Performance of Support Vector Machines for Fault Location

Debbie Johan Arredondo^{a*}, Juan José Mora^a Laura Melissa Román^a

RESUMEN

En este documento se presenta una metodología para encontrar los mejores datos de entrada o descriptores extraídos de las medidas de tensión y corriente de un sistema eléctrico de potencia, los cuales serán utilizados en una máquina de soporte vectorial para localización óptima de fallas. Este problema es importante debido que el tiempo de reposición de los sistemas en falla, deteriora considerablemente la calidad del servicio e incrementa el costo de la operación del sistema de potencia.

La técnica que se propone en este documento, para resolver el problema de localización de fallas, es una búsqueda exhaustiva de los descriptores que presentan altos índices de desempeño de la máquina de soporte vectorial.

En este el documento se presentan resultados que muestran cómo el desempeño de la máquina mejora considerando como variables de evaluación al tiempo y al error de validación.

Finalmente, las pruebas se realizan en el circuito de prueba IEEE 34 nodos. Los parámetros, la zonificación recomendada, técnica de normalización se obtienen de estudios previos.

PALABRAS CLAVE

Descriptores; máquina de soporte vectorial; fallas; localización de fallas; sistemas eléctricos de potencia; búsqueda exhaustiva.

ABSTRACT

This document presents a methodology to find the best input data (descriptors), obtained from the measurement of voltage and current of a power electrical system, which are used jointly with support vector machines for an optimal fault location. This problem is important because the reposition time of the faulted systems, highly deteriorate the service quality and increment the cost of the power system operation. The proposed technique is an exhaustive search of the inputs (descriptors), which give high performance indexes in the support vector machine. The results that evidence the performance in time and validation error of the machine are presented in this paper.

Finally, the different tests are performed in a IEEE 34 nodes power system. The used parameters, the zone division and the normalizing strategy were obtained from previous studies.

KEYWORDS

Descriptors; support vector machines; fault; fault location; electrical power network and exhaustive search.

Energética 44, diciembre (2014), pp.69-74

ISSN 0120-9833 (impreso)
ISSN 2357 - 612X (en línea)

www.revistas.unal.edu.co/energetica

© Derechos Patrimoniales
Universidad Nacional de Colombia



1. INTRODUCCIÓN

La calidad del servicio eléctrico se ve afectada de múltiples formas, debido a los tipos de fallas y a los diferentes dispositivos que componen el sistema eléctrico. Esto es un gran problema para los operadores del sistema, dado que una contingencia conlleva muchas pérdidas de dinero tanto para los usuarios como al operador.

El problema más crítico son las fallas permanentes, las cuales hacen que se presente una interrupción del servicio. Normalmente, el operador de red debe encontrar la falla para reconfigurar el sistema y reparar la falla, para así restablecer la continuidad del servicio lo más rápido posible para evitar mayores costos. En sistemas de distribución este problema es complejo debido a las características de la red; dada esta problemática la localización de fallas es un tema ampliamente estudiado, dado a que ayuda a reducir los costos globales de la distribución de energía hasta los usuarios finales [Lawrence, 1992].

Las técnicas para localizar fallas se dividen en dos grandes grupos, el primero se denomina métodos basados en el modelo (MBM) y se enfatizan en el modelamiento matemático del circuito bajo falla, utilizando las mediciones de tensión y corriente en la subestación como se muestra en [Mora, 2008; Morales, 2009]. Estos métodos presentan buenos resultados en la estimación de la distancia aproximada pero debido a la topología no radial de los sistemas de transmisión y distribución se tienen problemas de múltiple estimación [Morales, 2009]. Por otra parte, los métodos basados en el conocimiento MBC se basan en el aprendizaje de máquina de la respuesta del circuito bajo falla, evidenciado en las medidas de tensión y corriente. Estas técnicas permiten eliminar el problema de múltiple estimación presentados por los métodos basados en el modelo [Gutiérrez, et al., 2010; Thukaram, 2005].

Las máquinas de soporte vectorial aplicadas como localizadores de fallas en el sistema eléctrico, permiten encontrar resultados de buena calidad (localizar la zona del sistema donde ha ocurrido un problema - falla). Dado a que las SVM son unas herramientas que hacen parte de un área de estudio de la minería de datos y aprendizaje de máquina, el desarrollo de estas metodologías es de gran utilidad para el mejoramiento de los localizadores de fallas.

Las SVM son técnicas que permiten extraer el conocimiento de las bases de datos para utilizarlo de manera adecuada. Sin embargo, es computacionalmente costoso debido a que requiere de un gran volumen de datos para representar adecuadamente el problema y lograr resultados satisfactorios de desempeño. Trabajos como [Maldonado, 2007; Maldonado, 2012] muestran

como alcanzar mejores resultados con nuevas metodologías, las cuales involucran técnicas metaheurísticas para determinar errores de estimación menores y normalizaciones de los datos de entrada.

En este documento se presenta una estrategia que permite encontrar la mejor combinación de descriptores, los cuáles sean fácilmente separables por la metodología de aprendizaje, para generar un alto desempeño en cuanto al problema de localización óptima de fallas.

2 METODOLOGÍA

El aspecto teórico de las máquinas de soporte vectorial se fundamenta en la teoría de aprendizaje estadístico [Moguerza, 2006] y presenta grandes ventajas debido a que no necesita gran entendimiento de la densidad de probabilidad de los datos y con solo dos datos de penalización se puede llegar a un entrenamiento adecuado.

La Ecuación (1) se conoce como la función kernel y es fundamental en la máquina de soporte vectorial dado a que esta función es la que logra separar los datos de forma que la máquina pueda identificar adecuadamente los datos de validación.

$$k(\bar{x}, \bar{y}) = e^{-\gamma|\bar{x}-\bar{y}|^2} \quad (1)$$

Donde:

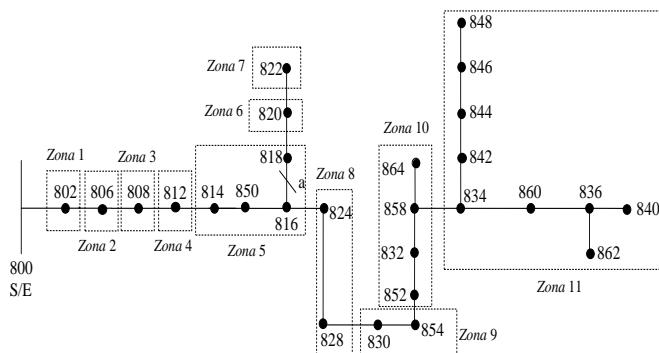
\bar{x} y \bar{y} son los datos de entrada y γ es uno de los factores de penalización.

Los datos de un circuito que pueden ser ingresados en la máquina de soporte vectorial para hallar una zona de falla pueden ser: potencia aparente, tensión de fase o línea, corrientes de fase o línea, impedancias, ángulos de corriente o tensión, frecuencia, entre otros. Escoger descriptores adecuados puede aumentar la eficiencia de la máquina tal como se demuestra en [Maldonado, 2012]. El desempeño de la máquina de soporte vectorial depende de diferentes parámetros, como ya se ha dicho los datos de penalización y los descriptores hacen una parte fundamental del problema, pero no son las únicas variables que afectan el resultado final. Por lo anterior, algunos autores [Mora, 2006; Gil, 2011] han encontrado metodologías las cuales se utilizan en este documento tal como se muestra posteriormente.

Una zonificación adecuada del circuito en el cual se harán las pruebas hace que la máquina funcione mejor. Se implementa en el circuito IEEE 34 nodos el cual se muestra en Figura 1. Con su respectiva zonificación (área donde se asumen los fallos).

Los parámetros de penalización se determinaron por pruebas realizadas anteriormente, en este documento se asumirán valores constantes.

La normalización de los datos de entrada es una función primordial, dado que grandes valores de entrada genera que el kernel no separe adecuadamente las diferentes muestras lo cual conlleva un lento entrenamiento y una mala clasificación de las zonas de falla, la normalización que ha presentado resultados buenos en la literatura

**Figura 1:** Zonificación circuito IEEE 34 nodos

Fuente.[Gil, 2011]

es la llamada normalización Min-Max y es descrita por la Ecuación (2).

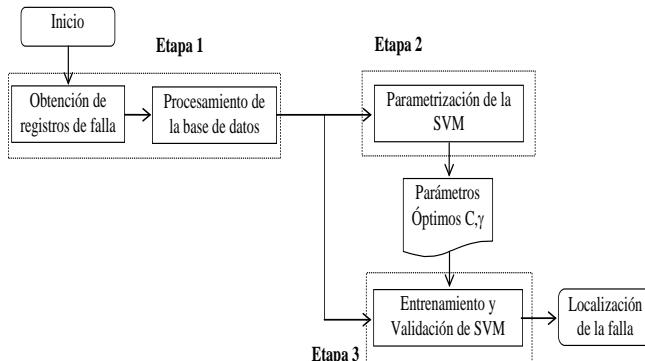
$$S'_{ij} = \frac{s_{ij} - \min_j}{\max_j - \min_j} \quad (2)$$

Donde, S'_{ij} Es el conjunto de datos normalizados.
Es S_{ij} el conjunto de datos a normalizar.
Es \min_j el valor mínimo del conjunto de datos j
Es \max_j el valor máximo del conjunto de datos j .

Esta normalización tiene buenos resultados gracias a que los datos se distribuyen en el intervalo {0-1}, diferentes normalizaciones se pueden ver en [Anil, 2005].

Uno de los principales parámetros que afectan en el desempeño del entrenamiento es el tipo de función a utilizar en el kernel para este documento se usa la función de base radial mostrada en la Ecuación (1)

La metodología básica aplicada al entrenamiento de máquinas de soporte vectorial es como se muestra en la Figura 2.

**Figura 2:** Esquema general metodológico para entrenamiento y validación.

Fuente. [Gil, 2011]

El enfoque general consiste en la misma metodología básica

Figura 2., pero el objetivo de este documento no es determinar unos parámetros C y γ (se asumen constantes en este documento), sino la combinación de descriptores adecuados para generar una localización de las fallas satisfactoria.

En este documento se presenta una búsqueda guiada en la combinación de variables de entrada a la máquina de soporte vectorial (descriptores del circuito), con el fin de minimizar un error de validación. La búsqueda consiste en la prueba del problema de clasificación teniendo como entradas la combinación exhaustiva, en grupo de dos, tres y cuatro descriptores.

Algunos de los descriptores se presentan en la Tabla 1, los cuales podrán ser relacionados con los resultados obtenidos con esta técnica de búsqueda.

Abreviatura	Descriptor
‘_dI’	Variaciones de las corrientes de fase entre prefalla y falla
‘_dV’	Variaciones de las tensiones de fase entre prefalla y falla
‘_dIL’	Variaciones de las corrientes de línea entre prefalla y falla
‘_dVL’	Variaciones de las tensiones de línea entre prefalla y falla
‘_dAngIlinea’	Variaciones de ángulo de corriente línea
‘_dAngVlinea’	Variaciones de ángulo de tensión línea
‘_dAngVfase’	Variaciones de ángulo de tensión fase
‘_dAngIfase’	Variaciones de ángulo de corriente fase
‘_Alf’	Angulo de la corriente de línea en estado de falla
‘_MIf’	Magnitud de la corriente de línea en estado de falla
‘_MVF’	Magnitud de la tensión de fase en estado de falla
‘_MVP’	Magnitud de la tensión de fase en estado de prefalla
‘_dFp’	Variaciones en el factor de potencia de fase
‘_dFpL’	Variaciones en el factor de potencia de línea
‘_dSL’	Variación en la potencia aparente total, entre prefalla y falla
‘_dX’	Variación en la reactancia de fase, entre prefalla y falla

Tabla 1: Descriptores del circuito

Fuente. Elaboración propia

3. RESULTADOS

La Tabla 2. resume las condiciones en las cuales se hacen las pruebas para el circuito IEEE 34 nodos.

Parámetro	Función
Kernel	Función de base radial
Normalización	Min-Max
Estado del circuito	Condición nominal
Zonificación	Predeterminada
Parámetros de penalización	$C=201656.7$ $=0.3316$
Número de fallas	1000
Número de fallas a validar	1000
Descriptores	Por determinar

Tabla 2:Condiciones de prueba

Fuente. Elaboración propia

Los resultados presentados a continuación fueron desarrollados en Matlab, y utilizado una máquina de soporte vectorial de uso libre.

Los descriptores a determinar en este documento fueron validados en una búsqueda exhaustiva desde la combinación de dos parámetros hasta la combinación de 4 de ellos (etapa 2 en la Figura 2). Las pruebas realizadas para combinaciones superiores dan resultados de mala calidad y entrenamiento sumamente lento, por lo tanto no se consideran en este artículo.

La prueba para las dos posibles combinaciones de descriptor es se muestra en la Figura 3. Cada descriptor es de un sistema trifásico real, entonces está conformado por un vector de tres elementos, por lo tanto en esta prueba el número real de descriptor es de seis. La combinación de dos descriptor es del circuito para la validación, genera 231 combinaciones, las cuales la máquina de soporte obtiene modelos aproximados y cada uno fue validado con una base de datos diferente a la del entrenamiento.

La Figura 3 muestra una señal que relaciona el número de combinaciones con respecto al error de validación, por lo tanto los picos más cercanos al cero son los valores de descriptor es que queremos utilizar para entrenamiento y validación; dado que estos llevan un error menor de estimación en el número de fallas.

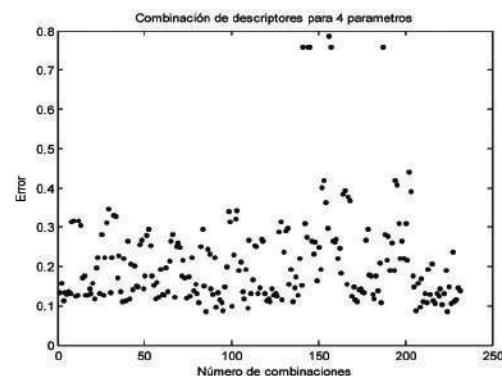


Figura 3: Combinaciones de dos descriptor es Vs error de validación

Fuente. Elaboración propia

En la Tabla 3 se muestran los 5 menores picos de la Figura.3 los cuales son las combinaciones de descriptor es adecuados para este procedimiento.

Número de vali- dación	Error (%)	Descriptores
224	8,44	'_Alf' '_dAngVlinea'
85	8,44	'_dI' '_dFpL'
94	8,67	'_dI' '_dAngIlínea'
204	8,67	'_MVF' '_Alf'
107	9,56	'_dIL' '_dAngIfase'

Tabla 3: Errores mínimos de Figura 3

Fuente. Elaboración propia

De la Tabla 3 se puede notar los diferentes descriptor es que dan un error de validación pequeño.

La Figura 4 es la gráfica que relaciona las diferentes combinaciones de descriptor es con el error de validación. Como las combinaciones de descriptor es son de tres elementos, entonces el número de combinaciones totales aumenta drásticamente para este caso el número de combinaciones es igual a 1540.

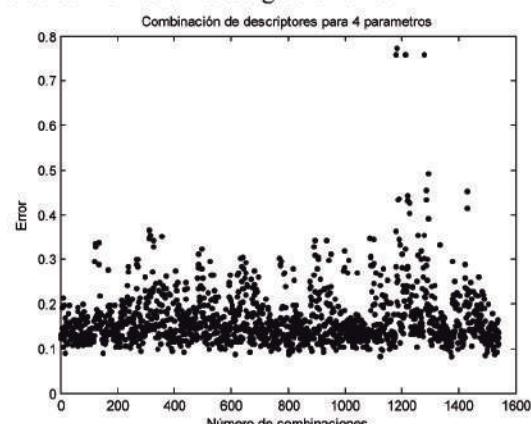


Figura 4: Combinaciones de tres descriptor es Vs error de validación

Fuente. Elaboración propia

En la Tabla 4 se hace la clasificación de los 5 menores picos de la Figura 4, estos son los descriptores que mejoran el desempeño de la máquina.

Número de validación	Error (%)	Descriptores
1121	8,22	'_dXL' '_dFp' '_dAngIlinea'
1373	8,22	'_dFp' '_dAngIfase' '_dAngIlinea'
1489	8,44	'_MVF' '_MIF' '_Alf'
615	8,67	'_dVL' '_dX' '_Alf'
800	8,67	'_dI' '_dFp' '_Alf'

Tabla 4: Errores mínimos de Figura 4

Fuente. Elaboración propia

De la búsqueda para 3 descriptores se puede ver que parámetros dan mejores resultados, respecto a la validación y entrenamiento Tabla 3.

En la Figura 5 se hace la combinación para 4 descriptores los cuales se validarán en la búsqueda exhaustiva y se encontrará la configuración óptima para los valores fijados los cuales son de mucha importancia en este proceso y en el error Tabla 2, el número total de combinaciones posibles para este caso fue de 7315.

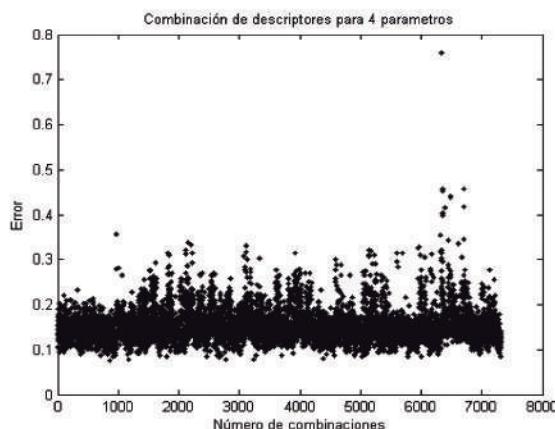


Figura 5: Combinaciones de cuatro descriptores Vs error de validación

Fuente. Elaboración propia

En la Tabla 5 se clasifican los 5 menores errores de validación, para encontrar los mejores parámetros.

Número de validación	Error (%)	Descriptores
2450	8,44	'_dSL' '_MIF' '_Alf' '_dAngIlinea'
5762	8,44	'_dX' '_dFp' '_MIF' '_dAngVfase'
5992	8,44	'_dXL' '_MVP' '_MVF' '_Alf'
7302	8,44	'_dAngVfase' '_dAngIfase' '_dAngVlinea' '_dAngIlinea'
713	8,67	'_dS' '_dIL' '_dFp' '_dAngIfase'

Tabla 5: Errores mínimos de Figura 5.

Fuente. Elaboración propia

De la Tabla 5 se puede notar la gran variedad de descriptores que pueden ser usado con los mismos resultados finales en error de estimación: es importante también recordar que cada uno de estos descriptores ya mencionados llevan 3 mediciones las cuales entran en la máquina de soporte como un conjunto que conforma el descriptor, entonces de este último caso en la máquina para cada validación y entrenamiento recibía 12 parámetros por cada combinación.

La mejor combinación de descriptores en el entrenamiento de la máquina fue de tres parámetros y fueron '_dXL' '_dFp' '_dAngIlinea', estos presentaron un error de validación menor, también los parámetros '_dFp' '_dAngIfase' '_dAngIlinea' obtuvieron el error de validación más bajo, se puede notar que un descriptor se encuentra en los dos grupos, este parámetro presenta datos altamente separables por la metodología de entrenamiento de la máquina, para ello se debe hacer un análisis más exhaustivo pero se puede decir que utilizar tres descriptores es más eficiente.

4. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos se puede determinar que los errores de validación son altamente dependientes de la calidad de los descriptores utilizados, dado que una variación en ellos puede hacer aumentar o disminuir el error de localización de fallas.

Adicionalmente, es importante notar que todos los resultados están relativamente cercanos en precisión del localizador de fallas, ya que las mejores combinaciones

de dos parámetros es tan buena como la combinación de cuatro parámetros, entonces es importante escoger el menor número de parámetros, dado que el tiempo computacional al tener menos descriptores se reduce considerablemente.

Como recomendación importante, se determinó que al encontrar los descriptores de mejor calidad se puede correr nuevamente el proceso mostrado en Figura 2, para hallar nuevamente los parámetros de penalización que reducen al mínimo los errores de validación cruzada.

Finalmente, se debe considerar que cada circuito tiene condiciones diferentes de operación entonces, se debe analizar esta metodología con muchas más condiciones y así poder hacer una máquina más robusta. Esta máquina de localización ayuda a mejorar los índices de continuidad del suministro y así mejorar el funcionamiento del sistema de potencia y los clientes atendidos.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó en el Grupo de Investigación en Calidad de Energía Eléctrica y Estabilidad (ICE3) financiado por la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP) y por medio del proyecto de investigación “Desarrollo de localizadores robustos de fallas paralelas de baja impedancia para sistemas de distribución de energía eléctrica -LOFADIS2012-”, contrato 0977-2012, financiado por Colciencias.

REFERENCIAS

- Anil J. , Karthik N., Arun R., “Score normalization in multimodal biometric systems”, *Pattern Recognition*, vol. 38, no.12, pp. 2270–2285, Dec. 2005.
- Gil, W.J. (2011). *Utilización de técnicas metaheurísticas en la búsqueda de parámetros óptimos para la calibración de las máquinas de soporte vectorial (SVM), para la localización de fallas en sistemas de distribución*. Tesis de pregrado, Programa de Ingeniería Eléctrica, Universidad tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia
- Gutiérrez J., Mora J., Pérez S., “Strategy based on genetic algorithms for an optimal adjust of a support vector machine used for locating faults in power distribution systems”, *Revista de la Facultad de Ingeniería*, 2010, no. 53, pp. 174-187. Jul. 2010.
- Lawrence D.J., Cabeza L., and Hochberg L., “Development of an advanced transmission line fault Location system part II—algorithm development and simulation,” *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 7, No. 4, Oct. 1992, pp. 1972–1983.
- Maldonado S., “Utilización de support vector machines no lineal selección de atributos para credit scoring”, Tesis de Maestría, Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile, 2007.
- Maldonado S., R. Weber, “Modelos de Selección de Atributos para Support Vector Machines”, *Revista Ingeniería de Sistemas*, 2012, no 26, pp. 49-70, Sep. 2012.
- Moguerza J., Muñoz A., “Support Vector Machines with Applications”, *Statistical Science*, vol. 21, no.4, pp. 322-336, 2006.
- Mora J., Carrillo G., Meléndez J., “Comparison of impedance based fault location methods for power distribution systems”, *Electric Power Systems Research*, vol. 28, no. 7, pp. 657–666, Apr. 2008.
- Mora, J.J. (2006). *Localización de Faltas en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica usando Métodos basados en el Modelo y Métodos de Clasificación Basados en el Conocimiento*. Tesis Doctoral. Departamento Tecnologías de la Informática, Universidad de Girona, Girona, España.
- Morales G., Mora J., Vargas H., “Fault location method based on the determination of the minimum fault reactance for uncertainty loaded and unbalanced power distribution systems”, *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA), 2010 IEEE/PES*, Sao Paulo, Brazil, pp. 803-809, Nov. 2009.
- Thukaram D., Khincha H., Vijaynarasimha H., “Artificial Neural Network and Support Vector Machine Approach for Locating Faults in Radial Distribution Systems”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.20, no.2, pp. 710-721, Apr. 2005.



Hidroeléctricas y desarrollo local ¿mito o realidad? caso de estudio: Hidroituango

Hydropower and Local Development Myth or reality? Case Study: Hidroituango

Maria Adelaida Torres^{a*}, Humberto Caballero^a, Gabriel Awad^a

Recibido: agosto 31 de 2014
Recibido con revisión: septiembre 22 de 2014
Aceptado: septiembre 23 de 2014

^{a*}Universidad Nacional de Colombia,
Sede Medellín
Facultad de Minas
Medellín, Colombia
Tel.: +(54) 3006341290
matorres@unal.edu.co

Energética 44, diciembre (2014), pp. 75-83

ISSN 0120-9833 (impreso)
ISSN 2357 - 612X (en línea)
www.revistas.unal.edu.co/energetica
© Derechos Patrimoniales
Universidad Nacional de Colombia



RESUMEN

El acceso a energía eléctrica ha permitido el crecimiento económico del último siglo, al permitir el desarrollo de la industria, la ciencia y la tecnología. Aunque los proyectos hidroeléctricos generan beneficios como el empleo y el acceso a energía, los innumerables impactos socio ambientales que generan los grandes proyectos y la magnitud de la afectación que generan, pone en duda que los beneficios reales compensen las afectaciones negativas. En el presente artículo se analizan los beneficios económicos de la construcción del proyecto Hidroeléctrico Ituango en los municipios que hacen parte del área de influencia, en especial, en los más cercanos a las zonas de obras. En el estudio se incluye tanto un análisis de las actividades económicas que se están realizando desde que iniciaron las obras en el 2009, como las actividades que se han dejado de realizar. Considerando que ésta hidroeléctrica será la central de mayor capacidad de generación construida en el país, el análisis de beneficios a escala local es pertinente para la planeación de proyectos energéticos a largo plazo. El análisis se realizó considerando el punto de vista de los ejecutores del proyecto, las autoridades locales, y las comunidades y organizaciones sociales del área de influencia. Del estudio puede concluirse que éste proyecto hidroeléctrico no genera desarrollo económico a escala local, por el contrario, los beneficios se trasladaran a poblaciones que no asumen los impactos negativos de la misma.

PALABRAS CLAVE

Desarrollo local; impactos socio ambientales; hidroeléctricas.

ABSTRACT

Access to electricity has allowed economic growth of the last century, enabling the development of industry, science and technology. Although hydroelectric projects generate benefits such as employment and access to energy, the innumerable social and environmental impacts generated by large projects and the magnitude of the impact they have, doubts that the real benefits outweigh the negative affectations. In this article the economic benefits of the construction of the hydroelectric project Ituango in municipalities that are part of the area of influence, especially in the more near work zones are analyzed. Therefore an analysis of the economic activities being undertaken since construction began in 2009, as the activities that have stopped performing included in the study. Considering that this will be the hydroelectric with the most generation capacity constructed in the country, analysis of benefits at local level is relevant for planning long-term energy projects. The analysis was performed considering the point of view of project implementers, local authorities, communities and social organizations in the area of influence. From the study it can be concluded that this hydroelectric project generates no economic development at local level, however, the benefits are transferred to people who do not take the negative impacts of it.

KEYWORDS

Local development; environmental impacts; hydroelectrics.

1. INTRODUCCIÓN

El proyecto Hidroeléctrico Ituango embalsará el río Cauca, eje fundamental de las dinámicas de poblamiento y de desarrollo en varias regiones de Colombia. Se localizan en esta cuenca la industria azucarera, la mayor parte de la zona cafetera, las zonas de desarrollo minero del bajo cauca y un sector importante de la industria manufacturera del occidente del país. El 70% de la población vive en la cuenca del río, concentrada en el Valle del Cauca, Antioquia y el Eje Cafetero [Cormagdalena & Universidad de Medellín 2006]. Desde la década del sesenta, se comenzaron a hacer estudios que permitieran identificar el potencial hidroeléctrico del río. En 1983 se realizó un estudio que demostraba la factibilidad de construir una hidroeléctrica en la zona conocida como el Cañón del Cauca, comenzando la construcción en el año 2009, cuando la autoridad competente otorgó la licencia ambiental [EPM Ituango, 2011b].

El desarrollo de centrales hidroeléctricas a gran escala produce una amplia gama de impactos socio ambientales, entendidos como la alteración que introduce una acción humana en su entorno, el impacto ambiental se origina en una actividad humana y se manifiesta en las modificaciones que produce en el ambiente, considerando tanto las afectaciones en el medio natural como humano [Gómez, 2003]. Dentro del estudio solo serán considerados los impactos asociados a dinámicas económicas, como la migración y el reasentamiento de las personas cercanas a los sitios de obras, los cambios en la economía rural y la estructura del empleo y los efectos sobre la infraestructura y la vivienda. Este artículo incluye un análisis de los beneficios económicos que genera el proyecto hidroeléctrico a corto plazo, como el empleo, y a largo plazo como las transferencias del sector eléctrico y el turismo.

Así mismo, se analizan las principales problemáticas socio económicas que han generado las obras. Inicialmente se explica la metodología que se utilizó en la realización del informe y la forma en cómo se llevó a cabo. Luego se presentan los resultados, donde se analizan las principales problemáticas que ha generado el proyecto y se comparan con los beneficios económicos, de tal forma que pueda concluirse si el desarrollo económico que genera el proyecto es suficiente para generar desarrollo local a pesar de las problemáticas que ha generado.

Finalmente, se determina en las conclusiones, si el proyecto hidroeléctrico ha generado desarrollo local, entendido como un proceso de crecimiento y cambio estructural que, mediante la utilización del potencial de desarrollo existente en el territorio, conduce a elevar el bienestar de la población de una localidad o una región [Vázquez, 2001].

1.1 Caso de estudio: Hidroeléctrica Ituango

Las obras principales del proyecto están localizadas en ambas márgenes del río Cauca entre las desembocaduras del río San Andrés y el río Ituango, ubicada al norte del Departamento de Antioquia, a 170 km por carretera de Medellín. En la Figura 1 se puede observar la ubicación del proyecto en el plano nacional y en el Departamento de Antioquia. El proyecto afecta en total a doce municipios: Santa Fé de Antioquia, Olaya, Liborina, Buriticá, Sabanalarga, Peque, Toledo, San Andrés de Cuerquia, Ituango, Briceño, Yarumal y Valdivia [Hidroeléctrica Pescadero Ituango 2007a].

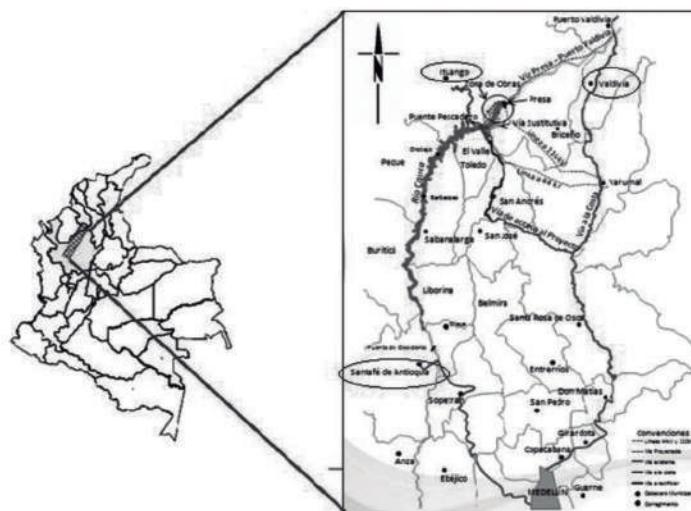


Figura 1: Ubicación del proyecto

Fuente. Adaptado de [Hidroeléctrica Pescadero Ituango 2007b] [EPM Ituango 2011b]

El proyecto aprovecha un caudal de 1.000 m³/s, comprende una presa de enrocado con núcleo de tierra con una altura de 225 m y una capacidad de 20 millones m³. Así mismo, se cuenta con obras para descargas de fondo e intermedia y un vertedero en canal abierto para evacuación de crecientes. Las obras de la central, localizadas en el macizo rocoso de la margen derecha, comprenden la caverna principal de la casa de máquinas, donde se alojan ocho unidades de 300 MW de potencia nominal cada una, con turbinas tipo Francis. Cada unidad de generación es alimentada por un túnel de conducción, que se inicia en una excavación sobre la margen derecha, en donde se ubica el conjunto de las ocho captaciones. En el exterior se tiene la subestación principal, a la cual llegan los cables de potencia aislados a 500 kV mediante un pozo inclinado [EPM Ituango, 2011b].

Complementan el proyecto otras obras asociadas, como el túnel de acceso a la casa de máquinas, el túnel de ventilación y salida de emergencia, los pozos de aireación de las almenaras y de extracción de humos, así como obras de infraestructura: vías de acceso, campamentos, línea de transmisión y subestación de construcción [Empresas Públicas de Medellín, 2013].

Las obras principales del proyecto hidroeléctrico se ubican en una zona conocida como El Cañón del Cauca, caracterizado por unas agrestes condiciones ambientales, como se observa en la Figura 2.



Figura 2: Cañón del Cauca

Fuente. Archivo personal

Como se observa en la imagen, en esta zona las condiciones de alta pendiente y el clima determinan las actividades económicas que pueden desarrollarse en este territorio, donde predomina la agricultura, la pesca y la minería artesanal en la parte rivereña [EPM Ituango, 2011c].

2. METODOLOGÍA

Para la realización del estudio, se comenzó buscando información sobre las actividades económicas que pueden realizarse en los embalses, como ecoturismo, pesca y deportes acuáticos. Se complementó con una búsqueda de las actividades económicas que se realizan en los municipios, de tal forma que se pudiera determinar cuáles podrían realizarse en cada lugar dependiendo de sus condiciones particulares. Así mismo, se revisaron las obras complementarias realizadas por el proyecto hidroeléctrico, como las vías, y se analizó de qué forma estas obras podían ser aprovechadas por las comunidades para realizar actividades económicas.

Dentro de la información considerada en el estudio se incluyeron los estudios ambientales del proyecto, con el Estudio de Factibilidad y el Estudio de Impacto Ambiental (EIA). También se realizó una revisión de los Planes de Desarrollo Municipales (PDM) desde el 2000 hasta la fecha, para identificar las expectativas de los municipios sobre las actividades económicas que podrían realizar en el embalse.

A parte de la información secundaria, se realizaron entrevistas en los municipios de Ituango, Valdivia y Santa Fé de Antioquia, dirigidas a tres grupos: funcionarios públicos de las alcaldías, contratistas del proyecto, comunidades y organizaciones sociales.

En las preguntas se incluyó un análisis de prospectiva sobre las condiciones económicas antes y durante la construcción del proyecto, y cuáles serían los beneficios futuro cuando se pasara a la fase de generación del proyecto. En total se realizaron diez entrevistas en Ituango, trece en Valdivia y 3 en Santa Fe de Antioquia. Como información complementaria se asistió a reuniones, foros y eventos académicos cuya temática fuera el proyecto hidroeléctrico

Como los proyectos de generación de energía realizan transferencias a los municipios con área de embalse, se analizaron, a partir de las proyecciones de la empresa ejecutora del proyecto, los ingresos para los municipios comparándolos con los recursos propios de cada uno.

Así mismo, se analizó, de acuerdo a la normatividad en que pueden ser invertidos.

Este artículo se deriva de la tesis de maestría titulada “*Análisis de nuevas dinámicas territoriales por proyectos de infraestructura y su influencia en la generación de conflictos socio ambientales. Caso de estudio: Hidroituango*”, presentada para acceder al título de Magíster en Medio Ambiente y Desarrollo de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

3. RESULTADOS

A continuación se muestran los principales resultados del estudio sobre las actividades económicas a nivel local desde que iniciaron las obras en el 2009, el turismo, el transporte y las transferencias del sector eléctrico. Identificados como los principales elementos a considerar para analizar si el proyecto podría tanto en el corto como en el largo plazo, generar desarrollo económico local.

3.1 Actividades económicas a nivel local

Para las comunidades que habitan en la zona conocida como el Cañón del Río Cauca, éste es el eje articulador de sus actividades económicas, culturales y sociales, por lo tanto, la construcción del proyecto, y en particular su operación, supone una ruptura de la principal relación que articula la vida de las comunidades, irrumpiendo de forma definitiva las relaciones sociales y económicas desarrolladas de forma ancestral en esta zona, donde las comunidades se han adaptado a las agrestes condiciones ambientales.

La construcción del proyecto hidroeléctrico genera una ruptura de las relaciones de parentesco, reciprocidad y complementariedad económica, dados los estrechos vínculos. Este rompimiento tendrá su máxima expresión con el llenado del embalse, que cortará las redes de caminos que comunican los asentamientos entre ambas

márgenes del río. Adicionalmente, esta actividad producirá la pérdida de los espacios de uso económico, que constituyen importantes alternativas para complementar los escasos ingresos de los asentamientos de la montaña [Hidroeléctrica Pescadero Ituango, 2007a].

Las obras han afectado el territorio de grupos de población minera y campesina, que habitando por fuera de las áreas requeridas para la construcción del proyecto, poseen una concepción cultural del territorio, en la que el Río Cauca también constituye un referente importante, que hace parte de su modelo económico de subsistencia [Hidroeléctrica Pescadero Ituango 2007a].

La población que desarrolla actividades productivas en los sectores primario, secundario y/o terciario dentro de los predios requeridos por el proyecto se ha visto obligada a cambiar su vocación productiva, especialmente la minería actividad económica que más se afecta con el desarrollo de la hidroeléctrica.

La construcción y posterior operación del proyecto hidroeléctrico impide realizar minería artesanal en esta zona, lo cual afecta tanto a los mineros, como a todas las personas que dependían de la minería de forma indirecta. Cómo parte de la adaptación de las comunidades al territorio, se generaron lazos de vecindad entre campesinos, arrieros y mineros, donde cada uno se beneficiaba de las actividades económicas que realizaban los demás. Por lo tanto, la afectación a la minería, también afecta otras actividades económicas como el transporte de mercancías realizado por los arrieros, la pesca y la agricultura [Ríos Vivos & Instituto de Estudios Regionales, 2013].

La incapacidad de realizar las actividades productivas que han desempeñado muchas comunidades en el territorio, ha generado desplazamientos voluntarios en busca de zonas donde puedan realizar dicha actividad. Así mismo, el recrudescimiento del conflicto armado desde que iniciaron las obras ha generado desplazamientos, por amenazas que impiden permanecer en el territorio. El inicio de obras principales del proyecto generó el desplazamiento de población de otras localidades del área de influencia, u otras regiones del departamento a la zona del proyecto en búsqueda oportunidades de empleo. La afluencia de población foránea se ha presentado en las cabeceras municipales de Ituango, San Andrés de Cuerquia y Toledo y a los corregimientos El Valle. Esta inmigración de población foránea a la región, con valores y costumbres diferentes; la captación de mano de obra local y la migración de los nativos, comprometen los patrones culturales de convivencia de las comunidades.

El desarrollo de las obras en el Valle de Toledo ha generado una presión migratoria muy fuerte sobre los municipios de Ituango, Toledo y San Andrés de Cuerquia. Al aumentar la cantidad de personas en la zona se dispararon problemas como la prostitución, la drogadicción, el alcoholismo [Asociación de Campesinos de Ituango, 2013], el aumento del embarazo adolescente y la prostitución infantil, una expresión muy utilizada en Ituango *“No hay plata, nos va a tocar irnos el finde para El Valle”* [Asociación de cacaoteros de Ituango, 2013], refleja la magnitud de este impacto y las implicaciones sociales para una comunidad de tradición campesina [Asociación Municipal de Mujeres de Ituango, 2013].

Aunque es innegable que el proyecto es una fuente de empleo, se ha abandonado del campo para trabajar en el proyecto. Existe una fuerte preocupación en la zona por el futuro de estas familias una vez se termine la fase de construcción, porque *“los campesinos están dejando la tierra para trabajar en la represa, y cuando terminen la construcción, donde van a trabajar, si este pueblo es de campesinos”* [Asociación de cacaoteros de Ituango, 2013]. La producción del campo ha disminuido, y las parcelas están abandonadas [Asociación de Comerciantes de Ituango, 2013].

Precisamente la preocupación de las comunidades es la dificultad que tendrán los campesinos para realizar nuevamente actividades agrícolas, ya que regresarían a un campo abandonado, con un ingreso menor al que recibían en las obras. Además, abandonar predios genera un fuerte sentimiento de desarraigo material, social y cultural. Afecta elementos territoriales de apropiación y niveles de pertenencia, sistema religioso, actividades económicas y relaciones de vecindad [Integral S.A, 1999]

Con el inicio de las obras se generaron muchas expectativas sobre la posibilidad de invertir en nuevos negocios o ampliar los que ya existían, pero para los comerciantes el proyecto ha generado un retroceso económico, ya que *“se generaron muchas expectativas frente al proyecto, entonces la gente invirtió o se endeudo para hacer negocios, pero después de cinco años en obras se han cerrado todo tipo de negocios, como cafeterías, restaurantes, tabernas”*. Por lo general el pueblo siempre está solo, *“el dinero no circula, no se ve el aporte de los que están trabajando en la obra”* [Asociación de Comerciantes de Ituango, 2013].

Así mismo, la construcción de la vía está beneficiando más a *“los de afuera que a los de adentro, está ingresando más mercancías de las que salen, la carretera se convirtió en una amenaza para los comerciantes, ya que todo lo que necesita el proyecto lo llevan desde Medellín y a los campesinos y comerciantes de Ituango no les compran nada”*. [Asociación de Comerciantes de Ituango 2013].

Desde que iniciaron las obras en 2009, los municipios más cercanos a las obras no se han visto beneficiados por el proyecto, por el contrario, se generaron muchas expectativas que no se han materializado. Así mismo, los problemas sociales que ha desencadenado el proyecto están generando muchos conflictos al interior de las comunidades. Al contrario de lo que se esperaba, el proyecto está generando numerosos impactos que no son retribuidos con la generación de empleo, único beneficio

económico para los municipios cercanos a las obras, que al mismo tiempo, no compensa las problemáticas sociales que ha generado el mismo.

3.2 Turismo

El turismo es una de las principales expectativas en los municipios del área de influencia del proyecto, quienes esperan que el embalse sea un atractivo turístico que permita potencializar el desarrollo económico de la región. Sin embargo, el turismo en los municipios del área de influencia va a depender de las condiciones ambientales, sociales y de seguridad.

Por ejemplo, los municipios cercanos al occidente del departamento, como Santa fe de Antioquia, Olaya y Liborina podrían recibir un mayor impacto del turismo, por la vocación turística de la zona y la infraestructura que se ha construido para desarrollar la actividad. En cambio, para los municipios del norte del departamento, como Ituango, Toledo, Briceño o San Andrés de Cuerquia, sería necesario primero invertir en infraestructura y seguridad, que permita el desarrollo de esta actividad económica. Santa Fe de Antioquia es el municipio que más podría beneficiarse en términos turísticos, ya que la alta demanda turística que tiene por su ubicación geográfica, sus condiciones climáticas y su arquitectura colonial, le exige unos servicios públicos básicos de alta capacidad y con una gran cobertura, pues los sistemas actuales no están en capacidad de atender dicha demanda en el largo plazo. La creciente infraestructura turística ha demandado la utilización de tierras para el establecimiento de hoteles, hosterías y fincas de recreo, ocupando suelos considerados con buena aptitud para el desarrollo agrícola, las cuales poseen las mejores condiciones y nutrientes. Además, las actividades turísticas establecidas de forma desordenada han generado un rápido déficit de agua en el municipio [Municipio de Santa Fe de Antioquia, 2008].

Para los municipios ubicados al norte del departamento, el turismo se convierte en una actividad económica totalmente nueva, con poco desarrollo dentro del territorio. Los atractivos turísticos con que cuentan los municipios no se han identificado y no se ha visualizado esta actividad como una alternativa para la generación de empleo y de ingresos a la población, por ejemplo, para San Andrés de Cuerquia “.....se pueden mencionar aspectos tan determinantes como el pésimo estado de las vías de acceso, la inexistencia de infraestructura turística en el municipio, el desconocimiento de los beneficios del turismo, la falta de definición de un producto turístico que ofrecer a propios y visitantes, la inexistente formación turística, la falta de eventos de importancia y desconocimiento de la legislación turística colombiana” [Municipio de San Andrés de Cuerquia, 2008].

Toledo es el único municipio que ha incluido al turismo en los PDM. Identificando la necesidad de “empezar a sensibilizar a las personas acerca del turismo a través de capacitaciones donde se cree la conciencia de protección y conservación del medio ambiente, teniendo en cuenta que la región está totalmente deforestada y solo cuenta con 165 ha de bosque reforestado para todo el municipio” [Municipio de Toledo, 2001], y reconoce la importancia de iniciar una reforestación y embellecimiento paisajístico.

Así mismo, el municipio plantea las siguientes sugerencias para el desarrollo turístico de la región [Municipio de Toledo, 2008]:

- Implementar programas eco turísticos que tiendan a aprovechar el anillo vial que une a los municipios de Ituango, San Andrés y San José.
- Programas de promoción que visibilicen la zona.
- Implementar programas educativos que enseñen a los ciudadanos a aprovechar la riqueza turística y a protegerla.
- Programas de recuperación del espacio público.
- Mejoramiento de los servicios de alcantarillado y acueducto, que pueda suplir las necesidades de consumo de agua que generaría el turismo.
- Carencia de vías de comunicación rural. Falta de mantenimiento de vías urbanas y rurales.
- Carencia de medios alternativos de transporte a la zona rural.

Un limitante para el desarrollo turístico de los municipios del norte del departamento es la presencia y accionar de grupos armados al margen de la ley y la historia de conflicto que se ha vivido en la región. Por lo tanto, se presentan muchas dificultades para el desarrollo del turismo, y se requeriría la unión de voluntades para mejorar la imagen que se tiene de la zona.

Dado que los municipios del norte no tienen vocación turística y sus comunidades no están preparadas ni capacitadas para realizar esta actividad económica, hay mucho escepticismo sobre cómo podrían beneficiarse por esta actividad económica. En particular, consideran que si el municipio no se hace cargo de las inversiones y no comienzan a empoderar desde ya a las comunidades, el beneficio del turismo sería para empresas foráneas que tengan la capacidad de realizar la actividad. Así mismo, no ven como se puedan beneficiar con el embalse si es propiedad privada de EPM, y si mientras se desarrollan las obras, les prohíben el paso por los caminos tradicionales, entonces como les van a garantizar el libre tránsito una vez se llene el embalse [Asociación de Comerciantes de Ituango, 2013].

El papel del Estado en relación a la planificación y al desarrollo del turismo está determinado no sólo por la tarea de definir una política de turismo, sino también por la de manejar temas tan relevantes como la promoción de los productos en el mercado extranjero, la elaboración de planes generales que contribuyan a mejorar la cantidad y calidad de la oferta, la coordinación y el financiamiento (a través de recursos propios o de otros agentes estatales) de un sin número de áreas como infraestructura vial, telecomunicaciones, transporte, entre otras. Además, el Estado debe generar las bases para el desarrollo y la regulación del turismo en las respectivas escalas nacionales, regionales y locales [Schulte, 2003].

Por lo tanto para el aprovechamiento turístico del embalse, sería necesaria una inversión conjunta entre el Departamento, la empresa ejecutora y los municipios del área de influencia, incluyendo la inclusión de dicha actividad dentro los Esquemas de Ordenamiento Territorial, de acuerdo con las potencialidades turísticas de cada municipios. En este sentido, no es claro como los municipios podrían hacer uso del embalse para desarrollar actividades económicas, ya que la declaratoria de utilidad pública establece que el área es del proyecto hidroeléctrico y Corantioquia declaró como zona de protección, por lo tanto hay usos restringidos y otros prohibidos. En el caso del turismo este es un uso permitido pero con ciertas restricciones.

Otro aspecto a considerar es que el proyecto podría detonar la especulación inmobiliaria y turística a su alrededor, por lo cual debe tenerse especial cuidado en cuanto a la tenencia de la propiedad entorno a este embalse, garantizando la efectiva inclusión del uso público y de conservación al que debería enfocarse [Universidad Nacional de Colombia & Gobernación de Antioquia, 2011b].

Sobre el turismo, el Ministerio determina que la empresa ejecutora del proyecto hidroeléctrico debe diseñar mecanismos de coordinación interinstitucional, para hacer viables proyectos que permitan establecer la conectividad entre los centros poblados del área de influencia del proyecto, teniendo en cuenta las sugerencias formuladas por las autoridades municipales y con miras a fortalecer dinámicas económicas que pueden activarse durante la etapa de operación del proyecto como el turismo [MAVDT, 2009a].

Sin embargo, este proyecto solo está incluido en el Estudio de Factibilidad. Al revisar el EIA actualizado del 2011, no se encuentran proyectos orientados a desarrollar el turismo o cumplir lo establecido por el ministerio. Así mismo, en la Ordenanza No 35 de 1997 de Corantioquia, quien ejecuta el proyecto es el responsable del estudio y planificación del desarrollo ambiental, turístico y recreacional de la zona del embalse. En este sentido, no se encontraron referencias que permitieran verificar el cumplimiento de lo estipulado por las autoridades ambientales.

Sobre esta actividad económica existe mucha expectativa en los municipios del área de influencia, sin embargo no encontraron evidencias de que se esté planeando realizar esta actividad.

3.3 Transporte

Los sistemas de movilidad, comprendida tanto por la infraestructura de soporte y los sistemas de transporte público para el ámbito rural, del área de influencia son muy precarios. La conectividad y accesibilidad a

los servicios en el ámbito rural presenta un panorama precario y de baja cobertura, con sistemas menores de puentes, caminos y senderos, al interior de los corregimientos y veredas [Universidad Nacional de Colombia & Gobernación de Antioquia, 2011b].

El Cañón del Cauca siendo una unidad geográfica lineal, presenta poco desarrollo en el sistema de movilidad subregional. La relación entre los centros urbanos es precaria y en muchos casos inconexa, reflejándose en un atraso regional y estancamiento de los sistemas tradicionales de producción rural [Universidad Nacional de Colombia & Gobernación de Antioquia, 2011b].

La accesibilidad entre las áreas rurales de los municipios más afectados y más cercanos a las obras, como Briceño, Toledo, San Andrés e Ituango carece de un sistema vial eficiente, hecho que incide en un aislamiento de la población rural con el sistema urbano y en los altos costos del transporte para la comercialización de sus productos [Instituto Geográfico Agustín Codazzi & Instituto para el Desarrollo de Antioquia, 2007].

Una de las obras del proyecto hidroeléctrico es la adecuación de la Vía sustitutiva El Valle – Ituango, inaugurada en julio de 2013. En época de lluvias llegar a Ituango tomaba hasta 12 horas, con la adecuación de la vía se redujo la duración del recorrido a la mitad, incluso puede llegar en 5 horas en carros particulares. A pesar de los beneficios para la comunidad por la reducción del tiempo y la disminución del pasaje, el estado de las vías terciarias del municipio es tan regular, que *“sin inversión en vías terciarias, la vía principal no significa ningún beneficio para los campesinos. El transporte Medellín- Ituango dura 6 horas, cuesta 37.000 y esta a una distancia de 187km, en cambio ir al principal Corregimiento Ituango, Santa Rita, dura 6 horas, el pasaje cuesta 26.000 y esta a una distancia de 64km, es más caro ir a Santa Rita que a Medellín”* [Asociación de Campesinos de Ituango, 2013].

Una situación similar se observa en los municipios cercanos a las obras principales del proyecto. El alcalde de Toledo solicitó de forma explícita que se necesitan *“proyectos de carácter regional que beneficien a la zona rural, carreteras que le permitan a los campesinos sacar las mercancías”* [Asamblea Departamental de Antioquia, 2013]. Para el municipio de Valdivia, la construcción y adecuación las vías terciarias es el principal objetivo que tienen con EPM, *“sería un beneficio real de la obra ya que generaría capacidad instalada en las zonas rurales, podrían sacar más mercancía”*. Así mismo, el mejoramiento de las vías podría convertir a Valdivia en un sitio turístico, ya que *“tiene paisajes muy bonitos”* [Espinosa, 2013].

En relación a las vías terciarias de los municipios del área de influencia, la referencia a la mala situación en que se encuentran y a su importancia estratégica para el desarrollo económico de las zonas rurales es una constante en todos los PDM. Siendo el principal obstáculo para la comercialización de los productos agrícolas.

Como parte del Plan Integral Hidroeléctrica Ituango se destinarán recursos por \$58.000 millones de pesos para la intervención

integral en vías secundarias, terciarias y caminos de herradura en los 12 municipios. En total se intervendrán 881 kilómetros en vías terciarias y caminos de herradura, que beneficiarán a por lo menos 90.000 habitantes del Norte y Occidente de Antioquia. Estas vías facilitarán el transporte de productos a los centros de consumo, el intercambio comercial entre las veredas y los corregimientos, reduciendo el tiempo de desplazamiento a los cascos urbanos y las zonas rurales [Gobernación de Antioquia, et al., 2013].

Otro factor a considerar dentro del transporte es la posibilidad de navegabilidad del río Cauca en el espejo de agua de 75 km, lo cual se presenta como una oportunidad de articulación y accesibilidad para los municipios del embalse, aumentando su grado de integración subregional y regional, y el surgimiento de nuevos usos [Universidad Nacional de Colombia & Gobernación de Antioquia, 2011a].

La navegabilidad de mercancías y personas podría permitir un mayor desarrollo y articulación de la región. En especial, permitirá dinamizar el comercio de bienes y servicios entre los municipios del Norte y el Occidente del departamento de Antioquia, ya que los agricultores y pequeños ganaderos podrían utilizar el embalse para transportar la mercancía. Todavía no es claro si las condiciones del embalse permitirían la navegación, ni en qué condiciones podría realizarse. No se encontró evidencia al respecto.

En relación a las vías, puede concluirse que el proyecto genera un impacto positivo en los habitantes de Ituango, Toledo y San Andrés de Cuerquia, al mejorar las vías de acceso y reducir los tiempos de viaje. Sin embargo, las inversiones en vías terciarias y la posibilidad de navegabilidad del embalse, podrían incidir directamente en el desarrollo económico de la región, y de las zonas rurales.

3.4 Transferencias del sector eléctrico

El proyecto hidroeléctrico requiere en total 22.365 ha para el embalse y todas las obras complementarias. [EPM Ituango, 2011a]. Como es un proyecto de generación de energía hidroeléctrica con una potencia nominal instalada mayor a 10.000 kilovatios, la norma establece que debe transferir el 6% de las ventas brutas de energía, destinando el 3% para las Corporaciones Autónomas Regionales con jurisdicción en la cuenca hidrográfica y el embalse, y el resto para los municipios localizados en la cuenca hidrográfica, donde el 1.5% es para todos los municipios y distritos de la cuenca hidrográfica que surte el embalse, y el 1.5% restante para los municipios donde se encuentra el embalse [Congreso de Colombia, 1993 art. 45].

La norma establece que estos recursos tienen una destinación específica y solo podrán ser utilizados por los Municipios en obras previstas en el Plan de Desarrollo Municipal (PDM), con prioridad para proyectos de saneamiento básico y mejoramiento ambiental, entendidos como ejecución de obras de acueductos urbanos y rurales, alcantarillados, tratamientos de aguas y manejo y disposición de desechos líquidos y sólidos [República de Colombia, 1994]. Así mismo, solo podrán destinar hasta el 10% para gastos de funcionamiento.

En el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) se encuentra una proyección de los ingresos que podrían percibir los municipios del área de influencia, como se muestra en la Tabla 1. El Municipio de Valdivia no percibirá ingresos por transferencias, ya que no hace parte de la cuenca ni tendrá área embalsada. Los municipios de Olaya, San Andrés de Cuerquia y Yarumal reciben regalías por aportar terrenos para zonas de protección y obras adicionales, como las líneas de transmisión.

Las transferencias del sector eléctrico que van a percibir los municipios una vez el proyecto entre en la fase de generación, es quizás el aspecto de la hidroeléctrica que más genera expectativa en los municipios del área de influencia. Estos presentan, en su mayoría, un bajo nivel de crecimiento económico, ya que su economía se basa principalmente en la producción agropecuaria, la cual se caracteriza por su baja productividad, la escasa competitividad de los sistemas productivos, la debilidad y desorganización de los procesos de comercialización [Municipio de San Andrés de Cuerquia, 2008]

Municipio	Valor total anual (millones)	Área Total (Ha)
Briceño	735.16	5891.8
Buriticá	1641.76	38270.3
Ituango	2290.73	18537.8
Liborina	890.49	22670.7
Olaya	29.7	8715
Peque	2248.41	32065
Sabanalarga	3425.97	28029.6
San Andrés de Cuerquia	72.7	21330.8
Santa Fe de Antioquia	302.25	45772.3
Toledo	1281.75	13535.1
Yarumal	25.5	7477.7

Tabla 1: Transferencias sector eléctrico a los municipios del área de influencia

Fuente. Adaptado de [EPM Ituango, 2011a]

El proyecto hidroeléctrico se convierte en una oportunidad para mejorar los ingresos de los municipios, para Sabanalarga, el proyecto “representaría una llegada masiva de recursos por regalías tanto, por ser municipio proveedor de agua, como también y en mayor escala, por ser uno de los cinco municipios con asentamiento directo en la zona de embalse” [Municipio de Sabanalarga, 2001]. En el caso de Ituango, uno de

los beneficios del proyecto “*en el mediano y largo plazo son los cuantiosos recursos de transferencias del sector eléctrico*” [Municipio de Ituango, 2012].

Para tener una idea de cuánto representan los ingresos por transferencias del sector eléctrico, se realiza una comparación de las cifras del presupuesto del municipio en el PDM para el periodo 2012-2015 y los ingresos estimados por transferencias, como se muestra en la siguiente Figura.

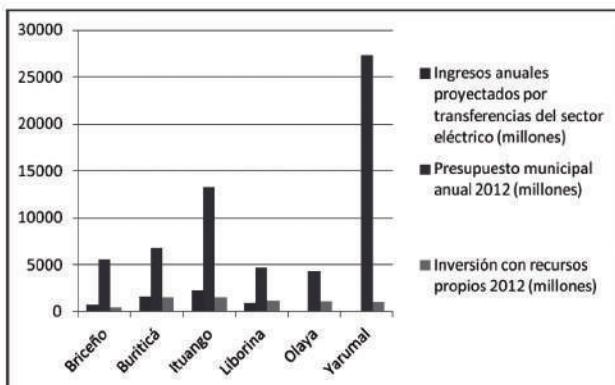


Figura 3: Comparación ingresos trasferencias vs presupuesto municipal

Fuente. Elaboración propia

El análisis de las cifras presentadas en la Tabla 3, evidencian que para municipios como Briceño, Buriticá, Ituango y Liborina, los ingresos por transferencias sobrepasan los recursos propios, y al compararlos con el presupuesto total del municipio, los recursos por transferencias equivaldrían a un aumento entre el 13%-24% del presupuesto total de los municipios. Así mismo, en el caso de Yarumal, los ingresos por transferencias representan el 0.09% del presupuesto total de los municipios.

Aunque los ingresos por transferencias representan un beneficio para los municipios, se observa una diferencia entre las proyecciones que realiza la empresa ejecutora y el imaginario de los alcaldes municipales, quienes en manifestaciones públicas coinciden en que los ingresos serán cuantiosos, cuando lo máximo que pueden llegar a representar es el 24% del presupuesto. En este sentido se evidencia una fuerte diferencia entre el imaginario sobre los recursos que ingresarán a los municipios y el valor real de los mismos.

Otro aspecto a considerar es la forma en cómo deben invertirse estos recursos. En una intervención pública el Alcalde de Ituango expresó su intención de invertir estos recursos en el mejoramiento de vías terciarias [Asamblea Departamental de Antioquia, 2013], cuando el municipio solo cuenta con un sistema de tratamiento para la potabilización del agua en la cabecera, con una

cobertura inferior al 100%, y gran parte del municipio presenta, en el área rural, problemas en cuanto a la calidad del agua para el consumo humano [Municipio de Ituango, 2012], evidenciando un desconocimiento de lo determinado en la norma y de los rubros en los que pueden invertirse estos recursos.

En este sentido los recursos por transferencias le permitirán a estos municipios realizar inversiones en aspectos en estado crítico para algunos municipios. Como los sistemas de alcantarillado, saneamiento básico y potabilización de agua, mejorando la calidad de vida de la población.

4. CONCLUSIONES

- La construcción de las obras generó un rompimiento del tejido social en las comunidades más cercanas a las zonas de obras, lo cual sumado a la llegada masiva de trabajadores al proyecto, está generando una serie de problemáticas sociales que impiden el desarrollo económico local.
- De los doce municipios del área de influencia solo tres, Santa fe de Antioquia, Olaya y Liborina, tienen vocación turística y una fuerte capacidad instalada para desarrollar esta actividad. Sin embargo, los problemas de abastecimiento de agua podrían convertir esta actividad en una amenaza para estos municipios.
- Para los municipios del norte como Ituango, Briceño, Toledo y San Andrés de Cuerquia, el turismo se dificulta para alta presencia de grupos armados al margen de la ley y la no vocación turística.
- La inversión en infraestructura vial podría contribuir al desarrollo económico local si se invierte en vías terciarias y se demuestra la navegabilidad del embalse. En este sentido, la inversión que incluye el Plan Integral en vías terciarias se convierte en la principal oportunidad de los municipios para aumentar la producción agropecuaria.
- La construcción y puesta en operación del Proyecto Hidroeléctrico Ituango, presenta un impacto positivo en el mejoramiento de las finanzas municipales resultado de las transferencias. Sin embargo, dichos ingresos no son tan significativos como los municipios esperan, y su inversión al estar condicionada por norma, permitirá satisfacer necesidades insatisfechas de la población como el acceso a agua potable, alcantarillado y saneamiento básico.
- La construcción del proyecto afectó toda la cadena productiva del Cañón del Cauca y las relaciones sociales que dependían de la misma.
- A partir de la definición de desarrollo económico local, puede concluirse que no se está generando un proceso de crecimiento económico a partir del potencial existente en el territorio. El análisis permite concluir que a corto plazo no se está generando desarrollo y en el largo plazo podrían generarse algunos beneficios en la calidad de vida asociados a las transferencias del sector eléctrico, pero dichos beneficios no compensan los impactos sufridos por la población con el desarrollo de las obras.

5. AGRADECIMIENTOS

A la comunidad, organizaciones sociales y funcionarios públicos y contratistas de los Municipios de Ituango, Valdivia y Santa Fé de Antioquia. A la Hidroeléctrica Ituango y EPM, por la información compartida. Gracias a ISA, por cuyo aporte a través de la beca fue posible realizar los estudios de posgrado. Al proyecto MG-SAI, Convenio Universidad Nacional-Departamento de Antioquia, por aportar los recursos para realizar las salidas de campo.

REFERENCIAS

- Asamblea Departamental de Antioquia, 2013. Sesión Descentralizada de la Asamblea Departamental de Antioquia en el Municipio de Ituango.
- Asociación de Campesinos de Ituango, 2013. Entrevista a Asociación de Campesinos de Ituango.
- Asociación de Comerciantes de Ituango, 2013. Entrevista al representante de Asociación de Comerciantes de Ituango- ASCOMI.
- Congreso de Colombia, 1993. Ley 99 de 1993. Diario oficial. Año cxxix. N. 41146. Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema .
- Cormagdalena & Universidad de Medellín, 2006. Plan estratégico para el manejo integral de la cuenca del río cauca. Available at: <http://www.cormagdalena.com.co/>.
- Empresas Públicas de Medellín, Página web. Available at: <http://www.epm.com.co> [Accessed August 13, 2013].
- EPM Ituango, 2011a. Actualización del Estudio de Impacto Ambiental.
- EPM Ituango, 2011b. Actualización del Estudio de Impacto Ambiental. Plan de inversión forzosa.
- EPM Ituango, 2011c. Proyecto Ituango.
- Espinosa Mariano, 2013. Entrevista al presidente Asocomunal, Municipio de Valdivia.
- Gobernación de Antioquia et al, 2013. Recursos por \$58.000 millones se invertirán en vías de los 12 municipios de la zona de influencia de Hidroeléctrica Ituango. Available at: http://antioquia.gov.co/PDF2/recursos_vias_hidroituango.pdf.
- Gómez Orea, D., 2003. Evaluación de impacto ambiental: un instrumento preventivo para la gestión ambiental., Mundiprensa Libros.
- Hidroeléctrica Pescadero Ituango, 2007a. Estudio de Impacto Ambiental.
- Hidroeléctrica Pescadero Ituango, 2007b. Estudio de Impacto Ambiental. Plano PI-PHI-EAM-CB-LG- LOC.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi & Instituto para el Desarrollo de Antioquia, 2007. Antioquia. Características geográficas.
- Integral S.A, 1999. Estudio de factibilidad Proyecto Hidroeléctrico Pescadero Ituango.
- MAVDT_Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2009. Resolución 0155 de enero 30 de 2009. Available at: www.minambiente.gov.co.
- Municipio de Ituango, 2012. Plan de Desarrollo Municipal 2012-2015 “El compromiso es de todos y todas” Alcalde Jaime Elias Montoya Londoño.
- Municipio de Sabanalarga, 2001. Plan de Desarrollo Municipal 2001-2003. Alcalde Hector Taborda.
- Municipio de San Andrés de Cuerquia, 2008. Plan de Desarrollo Municipal 2008-2011. San Andrés de Cuerquia ¡tan fácil de querer! Educado, solidario y dinámico. Alcalde Municipal Eduar Rolando Pino Arango.
- Municipio de Santa Fe de Antioquia, 2008. Santa fe de Antioquia es más. Plan de desarrollo 2008 - 2011. Alcalde Hemel de J. Leal Sarrazola.
- Municipio de Toledo, 2001. Plan de Desarrollo Municipal 2001-2003. Toledo Paraiso Ecológico. “Por un Toledo nuevo y honesto”. Alcalde Otoniel Valderrama.
- Municipio de Toledo, 2008. Plan de Desarrollo Municipal 2008-2011.Por un Toledo de todos y para todos.
- República de Colombia, 1994. Decreto 1933 de 1994. “Por el cual se reglamenta el artículo 45 de la Ley 99 de 1993”.
- Schulte, Silke, 2003. Guía conceptual y metodológica para el desarrollo y la planificación del sector turismo. Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social- ILPES Dirección de Proyectos y Programación de Inversiones. Serie Manuales #25.
- Universidad Nacional de Colombia & Gobernación de Antioquia, 2011a. Documento de recomendaciones a los procesos de revisión y ajuste de los POT e institucionalización del expediente municipal. Subregión Occidente.
- Universidad Nacional de Colombia & Gobernación de Antioquia, 2011b. Plan Piloto Diagnóstico de lectura territorial.
- Vázquez, A., 2001. Capítulo 1. La política de desarrollo económico local. In Desarrollo económico local y descentralización en América Latina: Análisis comparativo. Santiago de Chile: Proyecto Regional de Desarrollo Económico Local y Descentralización CEPAL/GTZ, pp. 21-45.

Identificación mejorada de componentes en baja frecuencia de turbinas eólicas empleando EEMD e integración en el tiempo

Improvement of low frequency identification for wind turbines employing EEMD and time integration

Cesar Augusto Aguirre-Echeverry^{a*}, Juan Diego Mejia-Henao^a, Oscar Cardona-Morales^a, Germán Castellanos-Dominguez^a

ABSTRACT

Nowadays wind turbines are widely employed as a clean energy resource. Their use implies a wide number of eolic structures which also requires a demanding monitoring and maintenance. Vibration analysis allows programming the maintenance in a proper time. In addition, the accessibility for installing several sensors into the machine is limited. Therefore, it is useful and needed to perform an analysis using just one sensor. In that sense, accelerometers can extract the velocity and displacement through a double digital integration, signals with additional information about the machine. However, digital integration evolves several difficulties such as biased errors, leakages in the signal, and others. This paper proposes a new methodology based on the ensemble empirical mode decomposition (EEMD) for extracting and improving interpretation of low frequency components from a wind turbine structure using a single-channel vibration measurement and double integration.

KEYWORDS

EEMD; wind turbines; time integration .

RESUMEN

Hoy en día las turbinas eólicas se emplean ampliamente como una fuente de energía limpia. Su uso implica gran número de estructuras eólicas que requieren vigilancia y mantenimiento exigente. El análisis de vibraciones permite programar mantenimientos en tiempos adecuados. Por otro lado, la instalación de varios sensores en la máquina es limitada. Por tanto, se debe realizar un análisis con solo un sensor. En ese sentido, los acelerómetros pueden extraer la velocidad y el desplazamiento, señales con información adicional de la máquina, a través de una doble integración digital. Sin embargo, la integración digital presenta varias dificultades, como errores sesgados, fugas en la señal, y otros. El presente trabajo propone una nueva metodología basada en la descomposición ensamblada de modos empíricos (EEMD) para la extracción e interpretación de componentes de baja frecuencia en estructuras de turbinas de viento empleando un canal de vibraciones y doble integración.

PALABRAS CLAVE

EEMD; turbinas eólicas; integración en el tiempo.

Recibido: septiembre 3 de 2014
Recibido con revisión: septiembre 25 de 2014
Aceptado: septiembre 25 de 2014

^{a*}Universidad Nacional de Colombia,
Sede Manizales,
Facultad de Ingeniería y Arquitectura,
Departamento de Ingeniería
Eléctrica, Electrónica y
Computación,
Tel.: +(57) 3015969282
caaguirreec@unal.edu.co
jdmejiah@unal.edu.co
ocardonam@unal.edu.co
cgcastellanosd@unal.edu.co

Energética 44, diciembre (2014), pp. 85-91

ISSN 0120-9833 (impreso)
ISSN 2357 - 612X (en línea)
www.revistas.unal.edu.co/energetica
© Derechos Patrimoniales
Universidad Nacional de Colombia



I. INTRODUCTION

In the last decades there have been especial interest in clean energies development including solar panels and wind turbines in issues related with monitoring and maintenance. Specially attention is required for wind turbines due their complex dynamical behavior together to the high cost of corrective maintenance. Those problems make necessary new methodologies to extract and to analyze sensible components of the wind turbines. In consequence, several studies have been carried on this topic in the last decade [1] [2] [3]. However the studies have been developed on signals under several damage levels in just acceleration format and using several channels for measurement. In real world applications, the accessibility for installing several mechanical vibration transducers into the machine is limited either by the physical space or the high cost of sensor networks. Therefore, it is useful and needed to perform an analysis using just one sensor. In order to extract several components of single channel signals, several methodologies have been studied as SSA [4], Wavelet [5] and EMD [6]. However, EMD offers a nonparametric advantage over the other techniques, conserving high decomposition capability. Recently, a new methodology based on EMD and called EEMD have been introduced [7] [8] improving the orthogonality of the decomposition, making more separable the IMFs. Nevertheless, the IMFs extracted from EEMD do not offer a complete interpretation about the components of the wind turbine. In order to solve this issue, a velocity and displacement signal could be added due they offer additional information about the machine operation, and they are specially suitable because the low frequency behavior typical of wind turbines and inherent of velocity and displacement signals.

In that sense, the accelerometers are commonly utilized since these sensors allow extracting the velocity and displacement information through a double digital integration procedure.

Nonetheless, digital integration methods present several issues as DC components drifted into accelerometer recordings [9], lack of initial conditions of velocity and displacement, and numerical integration errors [10]. Those problems remain without a final solution and just a few applications are studied in [11] [12] [13]. The present paper proposes a new methodology for components identification in wind turbines using displacement and velocity signals integrated from acceleration IMFs recordings. The methodology is based on iterative procedure where the signal is first decomposed using EEMD, then integrated in time domain and filtered using a high-pass filtering. The methodology shows visual improvement in the identification of low frequency behaviors of the machine and its results are promising for applications in other fields.

II. METHODS

A. Empirical mode decomposition (EMD)

Empirical mode decomposition is a method to decompose nonlinear, multi-component signals into a series of zero-mean AM-FM components that are called intrinsic mode functions. It was developed based on the assumption that any signal consists of different simple intrinsic modes of oscillations.

According to the definition of IMF [14], two conditions should be satisfied: 1) the number of extrema and zero crossings may differ by no more than one; 2) the local mean is zero. As discussed in [14], EMD is defined by the algorithm and does not have an analytical formulation. Given a signal $x_{(t)}$, the algorithm of EMD can be summarized as below [14]

1. Find all the local extrema of $x_{(t)}$.
2. Connect all the local maxima of the signal using a cubic spline line. The connected line is called the upper envelope $e_{max(t)}$. Similarly, find the lower envelope $e_{min(t)}$ with the local minima.
3. Calculate the mean of the upper and lower envelopes $m_{(t)}$, and the detail $h_{i(t)}$ can be obtained as follows

$$m_{(t)} = \frac{(e_{min(t)} + e_{max(t)})}{2}$$

$$h_{i(t)} = x_{(t)} - m_{(t)}$$

4. Check whether $h_{i(t)}$ is an IMF. If $h_{i(t)}$ is not an IMF, repeat the loop on $h_{i(t)}$. If $h_{i(t)}$ is an IMF, then set $c_{I(t)} = h_{i(t)}$.
5. Separate $c_{i(t)}$ from $x_{(t)}$, and a residual $r_{i(t)}$ can be given as

$$r_{I(t)} = x_{(t)} - c_{I(t)}$$

6. Treat the residual $r_{i(t)}$ as the original signal and iterate steps (1) (5) n 1 times. As a result, n -IMFs can be obtained, as follows:

$$r_{2(t)} = r_{I(t)} - c_{2(t)}$$

$$\bullet$$

$$\bullet$$

$$\bullet$$

$$r_{n(t)} = r_{n-1(t)} - c_{n(t)}$$

The decomposition process does not stop until the residual $r_{n(t)}$ becomes a monotonic function or a constant from which no more IMF can be extracted. Then the EMD is completed, and the original signal $x_{(t)}$ is decomposed as:

$$x_{(t)} = \sum_{i=1}^n c_{i(t)} + r_{n(t)}$$

B. Ensemble Empirical Mode Decomposition

This adaptive method decomposes time series into a set of so termed intrinsic mode functions (IMF), which follows: *i*) the amount of local extremes and the zero crossing differs at most by one, *ii*) at any point the mean value between the superior envelope defined by the local maxima and the inferior envelope defined by the local minima is zero. Thus, a time series $x(t)$ can be represented by EMD as follows:

$$x(t) = \sum_{k \in K} \hat{c}_k(t) + r(t), \forall t \in T$$

where $\{\hat{c}_k(t)\}$ is the set of IMF, $r(t)$ is the remainder term, and K is the number of the IMF extracted from original data. The first IMF is related to the highest frequency while the last one to the lowest.

However, EMD faces the mode mixing problem because of reached low orthogonality between neighboring IMFs. This issue is overcome by the use of the ensemble empirical mode decomposition (EEMD) that takes advantage of the additive white gaussian noise (AWGN) cancelation property within dyadic filter bank EMD structures [7]. The EEMD is sequentially carried out as follows:

- 1) An input time series $x(t)$ is contaminated with AWGN as much as J times, i.e., $x_j(t) = x(t) + \eta_j(t)$, $\forall t \in T, j = 1, \dots, J$, being $\eta_j(t)$, each j -th trajectory of the randomly generated AWGN,
- 2) Afterwards, obtained $x_j(t)$ is decomposed, using the conventional EMD, into the corresponding IMF set, $\{\hat{c}_{k,j}(t) : k = 1, \dots, K\}$.
- 3) At last, an averaged version of $c_k(t)$ is obtained as:

$$c_k(t) = \mathbb{E}\{\hat{c}_{k,j} : \forall j \in J\}, \forall t \in T$$

where notation $\mathbb{E}\{\cdot\}$ stands for expectation operator. Generally, J should be large enough to cancel the AWGN since there is a directly proportional relation between the standard deviation of the AWGN and the amount J .

C. Integration

In mechanical systems, the acceleration signal taken directly from the accelerometers has a DC component related with spurious voltage and current at the sensor. Characteristic perturbations in low frequencies are generated in double integration by two main sources: lack of velocity and displacement initial conditions and the natural behaviour of the integration process as a low pass filtering. Therefore, an accelerometer signal, as the decomposition outputs from EEMD, $c_k(t)$ is double integrated as follows:

$$v(t) = v(t_0) + \int_{t_0}^{\psi} c_k(\tau) d\tau, x(t) = x(t_0) + \int_{t_0}^{\psi} v(\tau) d\tau, x(\tau), v(\tau) \in \mathbb{R}$$

where $v(t)$, $x(t)$ are the velocity and displacement time series obtained from integration; $v(t_0)$, $x(t_0)$ are the initial conditions of velocity and displacement, respectively; t express the time domain, and t_0 , ψ are the integration limits. Usually in rotating machines, the initial conditions $v(t_0)$, $x(t_0)$ are not provided since only $c_k(t)$ is measured, and the lack of those variables introduce a linear increment into displacement signals [15]. Besides, the double integration process can be seen as a natural low-pass filtering where the magnitude of the significant frequency components becomes less than the noise components [10]. In order to solve those issues, a high-pass filter is introduced below. The magnitude squared frequency response $H_{(j\omega)}$ of a Butterworth filter is:

$$|H_{(j\omega)}|^2 = \frac{1}{1 + (\frac{\omega}{\omega_c})^{2n}}$$

where, n is the order of filter, ω_c is the cutoff frequency (-3dB frequency) and ω represents frequency in radians. The IIR filters offer the same magnitude response specifications than FIR filters, but with lower order, making the computational calculus faster than FIR filters [16], [?]. Therefore, an alternative approach to represent an IIRfilter is given by:

$$\eta_{[n]} = - \sum_{i=1}^M \alpha_i \eta(n-i) + \sum_{j=1}^L \beta_j \chi(n-j)$$

where $\alpha_i = , 0, 1, 2, \dots, M =$ and $\beta_j = , 1, 2, \dots, L$ are the coefficients of the filter. Again, $\eta_{[n]}$ represents the sampled signals $v_{[n]}$ and $x_{[n]}$. The Butterworth filter rolls off more slowly around the cut-off frequency and more linear phase response than others like Chebyshev or elliptic, but without ripple maintaining the same shape for higher orders. That feature is an advantage for low spurious components removal and allows smoother filtering results. These filters properly adjust the cut-off frequency according to frequency behaviour of data, allowing analysis even for monitoring under nonstationary operating condition [17].

III. EXPERIMENTAL SETUP

The present paper proposes an analysis of signal decomposition of a wind turbine acceleration signal. EEMD is employed to decompose the signal and then an iterative algorithm to double integration is used in order to improve the interpretability of the main signal components by using the velocity and displacement signals. Firstly, a preprocessing step is applied to eliminate the DC noise from the acceleration recording. Secondly, EEMD is employed to decompose the original signal in their corresponding IMFs. Thirdly, time domain integration with trapezoidal rule is employed and a Butterworth filter is used after integration to remove the spurious components resulting from the lack of initial conditions and integration numerical errors. Then, the methodology is repeated in order to obtain the velocity and displacement time series. Lastly, displacement and velocity spectrums are inspected visually aiming to retrieve cleaner information about components of the wind turbine signal. The proposed methodology is presented in the Figure 1.

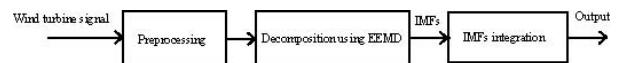


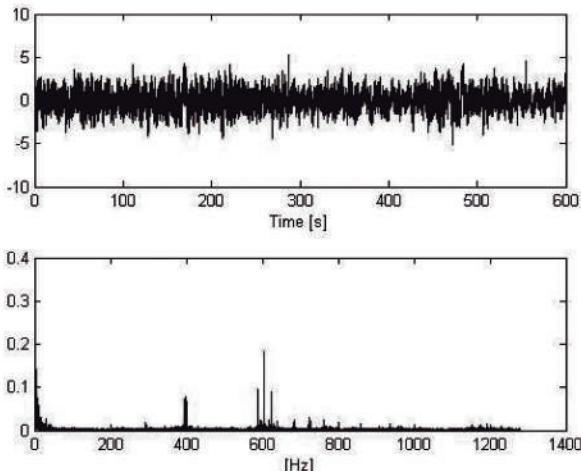
Figure 1: Methodology scheme

The current methodology for temporal integration with high pass filtering correction is described in the Table.

Input: $IMFs_{(t)}$
Initialization
1. $A_{(t)} = \text{Normalize}(IMFs_{(t)})$
2. $V_{(t)} = \text{Timedomainintegration}(A_{(t)})$
3. $V_{filt} = \text{Butterfilter}(V_{(t)})$
4. $D_{(t)} = \text{Timedomainintegration}(V_{filt})$
5. $D_{filt} = \text{Butterfilter}(D_{(t)})$
end
Outputs: V_{filt}, D_{filt}

Table I: Algorithm 1**A. Database**

The vibration acceleration signal used in the study was acquired on the tower of a NegNicon NM52/900 wind turbine located at the Rhodes Wind Farm, Greece (IWECO M.V. S.A.). The wind generator consists of a tubular steel tower of approximately 49 m tall and blades that are 25 m long. A set of piezoelectric accelerometers are placed within the height of the tower, measuring (via a 4-channel portable data acquisition device) vibration in the x and y directions parallel to the horizontal plane. For this paper, only the data acquired at sensor D (48 m above the ground) along the x direction is used. Following acquisition, the signals are normalized and resampled. Wind speed, average rotor and generator speed are also monitored by means of an in-situ SCADA system [18]. The original signal can be seen in the Figure 2.

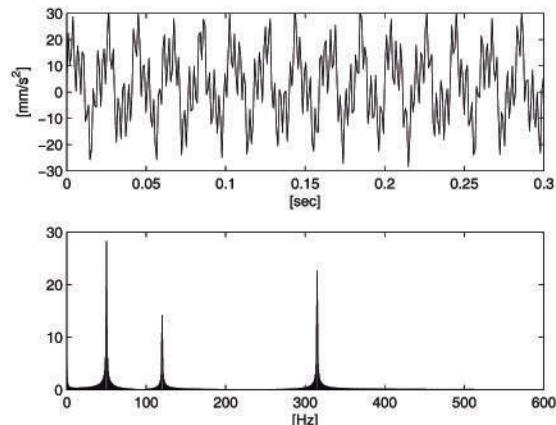
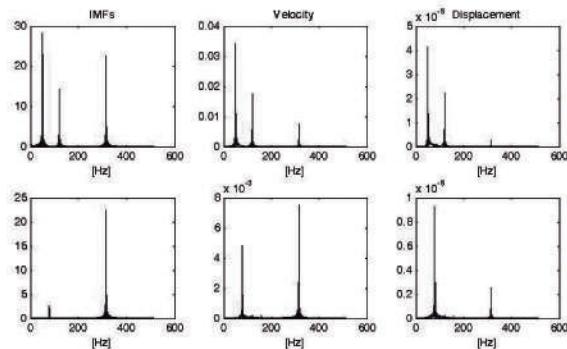
**Figure 2:** Original vibration acceleration signal from the wind turbine.**B. Experiment 1: synthetic signals**

A synthetic signal similar to vibration acceleration signal is selected from [12] and defined as follows:

$$A_{(t)} = 10\sqrt{2}\sin(2\pi 50t) + 5\sqrt{2}\sin(2\pi 120t) + 8\sqrt{2}\sin(2\pi 315t)$$

The factor of $\sqrt{2}$ has been included explicitly for relating the amplitude and the rms signal value. The sampling frequency is established as 1024 Hz and 1 second of duration [19]

In the Figure 3 shows the synthetic signal in time and frequency domain. Only it is shown a relevant part of the signal where is possible to observe the spectral components in low frequency. The proposed methodology is applied to the synthetic signal and the results can be seen in the Figure 4. Only frequency domain is shown due it contains the relevant interpretable information about the signal. As can be seen in the Figure 4, only two IMFs are shown due they contain the main information of the signal. Also, the low frequency components of the signal are magnified in the integration process and the high frequency levels decreased. In real wind turbine signals, the desire bandwidth is in low spectrum, so the integration process proves to be useful for further analysis.

**Figure 3:** Synthetic signal (up) time and (down) frequency domain.**Figure 4:** Synthetic signals using the methodology proposed.**C. Experiment 2: Real signals**

For this experiment single channel signal from wind turbine is employed. After applying decomposition process with EEMD, the IMFs are obtained. The last IMFs obtained are too monotonic and it can be discarded from the analysis. Also, the first IMFs are too similar to the original signal, and it is difficult to extract components directly from them. For the present study, the IMFs 3 to 5 are showed due they represent better the energy distribution of the signal in several bands.

Once with the pseudo-channels it is feasible to applied integration methodology and then to analyse the velocity and displacement time series.

Time-Frequency representation (TFR) is used in order to visualize the differences between each IMF and its corresponding velocity and displacement representation. Integration results are shown in Figure 5, Figure 6 and Figure 7, where it is possible to observe that according as the acceleration signal is integrated, the amplitude of spectral components in low frequency is compensated. Thereby, in vibration velocity and displacement, the spectral information is considered as machine general vibration because the amplitude preserves the original magnitude of spectral components. The scales in the time series of Figure 5, Figure 6 and Figure 7 are not the same because of the amplitude modification in the integration process. In order to visualize the time series signal, the scales in time representation have been modified.

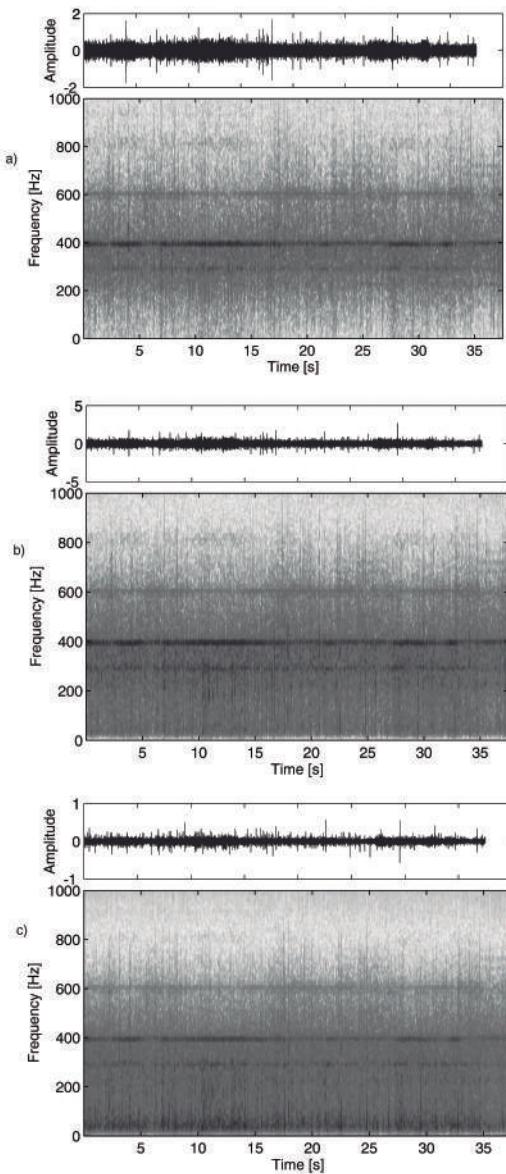


Figure 5: Proposed methodology for IMF 3. a) IMF, b) Velocity and c) Displacement

The velocity and displacement signals are useful for further analysis in model-based damage identification or directly inference of direct failures detection given the rules of correct behavior of the rotating machine according the manufacturer.

IV. CONCLUSION AND DISCUSSION

The present paper proposes a new methodology for improving visual interpretation of low frequency information from wind turbines using a single channel record based on EEMD decomposition and temporal digital integration. The current methodology is tested with synthetic signals and then it is applied to signals from a wind turbine structure. The visual results evidence the feasibility of the methodology to improve the identification of low frequency components in frequency domain. Although EEMD shows several advantages over other techniques like SSA and discrete Wavelet, future work will

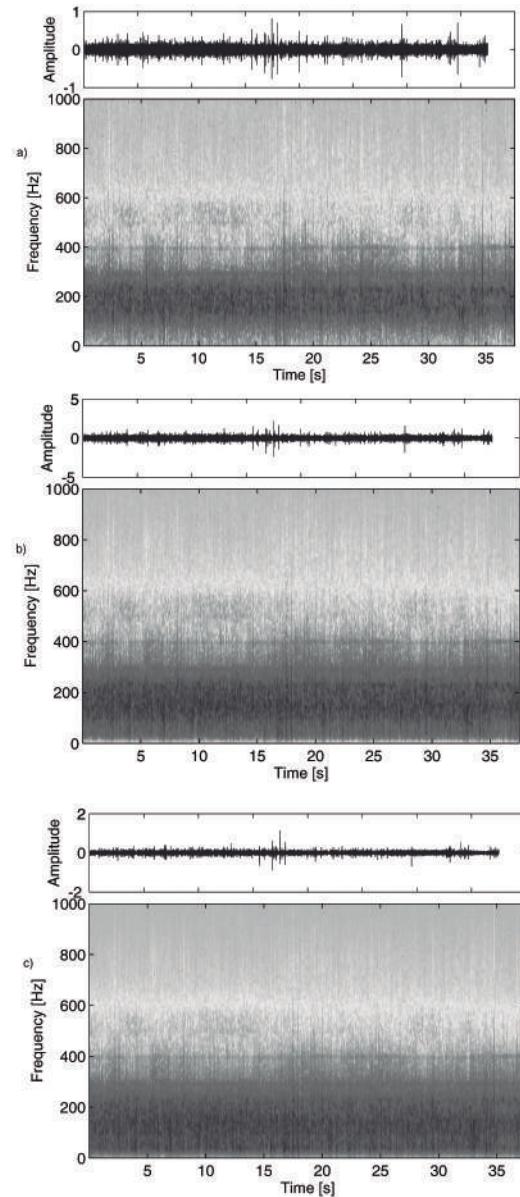


Figure 6: Proposed methodology for IMF 4. a) IMF, b) Velocity and c) Displacement

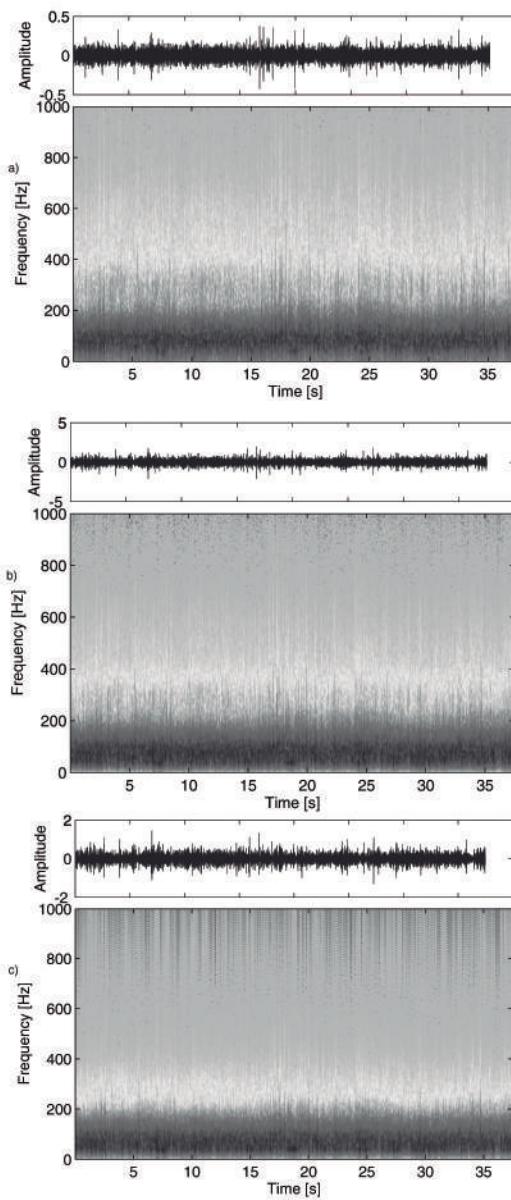


Figure 7: Proposed methodology for IMF 5. a) IMF, b) Velocity and c) Displacement

explore the use of those decomposition methods for component identification. Also, a model-based analysis using the acceleration, velocity and displacement signals will give more information about the failures and their spatial localization. The current methodology can be applied to other rotating machines as pumps, vessels engines and others.

V. ACKNOWLEDGEMENT

This research is supported by “Programa Jóvenes Investigadores e Innovadores convocatoria 617 de 2013, Convenio Especial de Cooperación No. 0737 de 2013 entre COLCIENCIAS y la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales”

REFERENCES

- [1] Z Hameed, YS Hong, YM Cho, SH Ahn, and CK Song. Condition monitoring and fault detection of wind turbines and related algorithms: A review. *Renewable and Sustainable energy reviews*, 13(1):1–39, 2009.
- [2] Tomasz Barszcz and Robert B Randall. Application of spectral kurtosis for detection of a tooth crack in the planetary gear of a wind turbine. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23(4):1352–1365, 2009.
- [3] WY Liu. The vibration analysis of wind turbine blade–cabin–tower coupling system. *Engineering Structures*, 56:954–957, 2013.
- [4] Wan-Ying Hsiung, Yu-Ting Huang, Chin-Hsiung Loh, Kenneth J Loh, Robert J Kamisky, Danny Nip, and Cornelis van Dam. Analyzing the dynamic response of rotating blades in small-scale wind turbines. In *SPIE Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, pages 90612A–90612A. International Society for Optics and Photonics, 2014.
- [5] Cao Lei and Li Ran. Short-term wind speed forecasting model for wind farm based on wavelet decomposition. In *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008. DRPT 2008. Third International Conference on*, pages 2525–2529. IEEE, 2008.
- [6] Yassine Amirat, Mohamed Benbouzid, Tianzhen Wang, and Sylvie Turri. Performance analysis of an eemd-based hilbert huang transform as a bearing failure detector in wind turbines. In *Green Energy, 2014 International Conference on*, pages 193–198. IEEE, 2014.
- [7] NE Huang and Z Wu. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method advances in adaptive data analysis vol. 1. 2009.
- [8] O Cardona-Morales, EF Sierra-Alonso, and G Castellanos-Domínguez. Identification of wind turbine natural frequencies using narrow-band decomposition methods. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 55(8):433–437, 2013.
- [9] Sangbo Han. Measuring displacement signal with an accelerometer. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 24(6):1329–1335, 2010.
- [10] Timothy S Edwards. Effects of aliasing on numerical integration. *Mechanical systems and signal processing*, 21(1):165–176, 2007.
- [11] Win Tun Latt, Kalyana Chakravarthy Veluvolu, and Wei Tech Ang. Drift-free position estimation of periodic or quasi-periodic motion using inertial sensors. *Sensors*, 11(6):5931–5951, 2011.
- [12] J Yang, JB Li, and G Lin. A simple approach to integration of acceleration data for dynamic soil–structure interaction analysis. *Soil dynamics and earthquake engineering*, 26(8):725–734, 2006.
- [13] David M Boore and Julian J Bommer. Processing of strong-motion accelerograms: needs, options and consequences. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25(2):93–115, 2005.
- [14] Qiang Miao, Dong Wang, and Michael Pecht. Rolling element bearing fault feature extraction using emd-based independent component analysis. In *Prognostics and Health*

- Management (PHM), 2011 IEEE Conference on*, pages 1–6. IEEE, 2011.
- [15] Thai Minh Do and Thong Chi Le. Performance analysis of fft filter to measure displacement signal in road roughness profiler. *International Journal of Computer & Electrical Engineering*, 5(4), 2013.
 - [16] SR Masrol, MA Madlan, S Mohd Salleh, Maznan Ismon, and Mohd Nazrul Roslan. Vibration analysis of unbalanced and misaligned rotor system using laser vibrometer. *Applied Mechanics and Materials*, 315:681–685, 2013.
 - [17] Mengyuan Xu, Wayne A Woodward, and Henry L Gray. Using time deformation to filter nonstationary time series with multiple timefrequency structures. *Journal of Probability and Statistics*, 2013, 2013.
 - [18] Luis David Avendaño-Valencia, Minas D Spiridonakos, and Spiliros D Fassois. In-operation identification of a wind turbine structure via non-stationary parametric models. In *Proceedings of the International Workshop on Structural Health Monitoring IWSHM*, page 2611, 2011.
 - [19] Colin Mercer. Acceleration, velocity and displacement spectra omega arithmetic. *Prosig signal processing tutorials*, 2006.

Energías renovables y turismo comunitario: una apuesta conjunta para el desarrollo humano sostenible de las comunidades rurales.

Alternative Energy and Community Tourism: a Joint Commitment to Sustainable Human Development in Rural Communities

Tania Jiménez Castilla^{a*}

RESUMEN

Territorios rurales presentan potencialidades para actividades que no tienen que estar ligadas necesariamente a la actividad agrícola. El turismo comunitario y la producción de energías renovables, que ofrece la multifuncionalidad del espacio rural pueden ser aprovechadas en favor del progreso de la población local, generalmente, la más vulnerable. El disfrute de la naturaleza, el entendimiento de la cultura del territorio y la participación en los estilos de vida de la población local rural, hacen parte de un nuevo enfoque del turismo que puede aprovecharse y resultar en estrategias innovadoras para la comunidad; adicional a ello, la utilización de energía renovable, contribuye a los fines de sostenibilidad del destino, y se constituye en un elemento turístico adicional. En el artículo se analiza la contribución de las energías renovables y el turismo comunitario en espacios rurales, como una estrategia conjunta para el desarrollo humano sostenible de las comunidades locales. Se realiza un análisis descriptivo y cualitativo, teniendo como base la revisión exhaustiva de artículos científicos, documentos de investigación e informes de agencias e instituciones internacionales y la observación participante en varias regiones de América Latina.

PALABRAS CLAVE

Desarrollo humano sostenible; desarrollo rural; desarrollo sostenible; energías renovables; turismo comunitario.

ABSTRACT

Rural areas have potential for activities that do not necessarily have to be linked to agriculture. Community tourism and renewable energy production, offering multifunctionality of rural areas can be exploited for the advancement of the local population generally the most vulnerable. The enjoyment of nature, understanding the culture of the territory and participation in the lifestyles of the local rural population, are part of a new approach to tourism that can be harnessed and lead to innovative strategies for the community; Further to this, the use of renewable energy, contributes to the sustainability of the destination late, besides being an additional tourist element. In the article the contribution of renewable energy and community tourism in rural areas, as a joint strategy for sustainable human development of local communities is analyzed. A descriptive and qualitative analysis is performed, based on an exhaustive review of scientific articles, research papers and reports from international agencies and institutions and participant observation in several regions of Latin America.

Energética 44, diciembre (2014), pp. 93-105

ISSN 0120-9833 (impreso)
ISSN 2357 - 612X (en línea)
www.revistas.unal.edu.co/energetica
© Derechos Patrimoniales
Universidad Nacional de Colombia



KEYWORDS

Sustainable human development; rural development; sustainable development; renewable energy; community tourism.

1. INTRODUCCIÓN

En el espacio rural confluyen un sinnúmero de situaciones que hacen compleja la tarea de articular, en la formulación de las políticas públicas, el criterio de sostenibilidad. El concepto de “lo rural” se encuentra directamente asociado a las actividades agrícolas; sin embargo, la agricultura tradicional, por sus características, tiene limitaciones para contribuir de manera efectiva al desarrollo sostenible de las zonas rurales. Son nuevas actividades, las que pueden coadyuvar en este propósito [Burguillo & del Río, 2008].

Los territorios rurales presentan potencialidades que se fundamentan en el reconocimiento de los activos naturales, ambientales y culturales del territorio. Esta multifuncionalidad puede ser aprovechada para diversificar la matriz productiva en favor del progreso de la población local, que generalmente es la más vulnerable. La producción de energías renovables y el turismo rural comunitario pueden ser algunas de estas actividades.

El nuevo enfoque del turismo se encuentra cada vez más interesado en la naturaleza y la vida rural (turismo comunitario, ecoturismo, turismo cultural) y sobre esta base, la contribución del turismo al desarrollo local de la comunidad rural es significativa. Por otra parte, la producción de fuentes de energía, alternativas a las fósiles para el uso a gran escala, podría contribuir a generar nuevos ingresos a los habitantes locales, en tanto y en cuanto, el territorio rural es concebido como proveedor de energías renovables.

Bajo un enfoque descriptivo, a partir de la revisión exhaustiva de trabajos técnicos y científicos; informes de organismos internacionales; documentos como resultados de proyectos e investigaciones; y la observación participante, el presente trabajo analiza las sinergias existentes entre el turismo comunitario y las energías renovables, como una estrategia conjunta que contribuye al desarrollo humano sostenible de las comunidades rurales.

En el segundo apartado se realiza una introducción acerca de las razones para impulsar la producción de energías renovables, con especial énfasis en América Latina. En el tercer apartado se sustenta teóricamente la importancia del concepto de desarrollo humano y rural sostenible y la relevancia de la contribución de las energías renovables en la sustentabilidad del desarrollo de las comunidades rurales. Luego, se procede a explicar las características del turismo rural comunitario y las razones por las cuales se requiere que éste sea sostenible. Por último, se explica la contribución que pueden hacer la generación de energías renovables y el turismo comunitario al desarrollo humano sostenible. En este apartado se explican casos y experiencias, con

especial énfasis en América Latina y Colombia, aunque también se detallan experiencias de Europa, Asia y África.

2. EL ESTÍMULO A LAS ENERGÍAS RENOVABLES

En el ámbito global, han sido varios los factores ambientales, económicos y geopolíticos que han propiciado un renovado impulso a la investigación y financiación de fuentes energéticas de carácter renovable, que puedan constituirse en una alternativa frente a las fósiles, como el carbón, el gas y el petróleo. El deterioro de los ecosistemas; la emisión de gases de efecto invernadero; el agotamiento de las fuentes convencionales; el alto costo del petróleo; la situación de inestabilidad política, institucional y social de los países productores y exportadores de energía fósil; y de forma más reciente, la crisis económica y financiera mundial que afectó a todos los sectores y mercados incluido el energético, han constituido un conjunto de razones de tipo multidimensional para que científicos, académicos, empresas y gobiernos se encuentren cada vez más interesados en destinar recursos con el objeto de encontrar alternativas energéticas que garanticen la seguridad de suministro y la sostenibilidad. A estos esfuerzos, se suman las políticas que impulsan procesos para incrementar la eficiencia energética, buscando obtener como resultado, la mitigación en el daño de los ecosistemas y en la calidad del aire; el ahorro en el consumo y por tanto, mayor productividad.

Europa es una de las mayores productoras de energía eólica y de células fotovoltaicas (24,6% de la producción mundial). Según datos del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas – [CIEMAT 2008], se calcula que en la Unión Europea había instalados 20 millones de m² de captadores solares (14.280 MWt) a finales de 2006, Por otra parte, el consumo de biocarburantes datos 2006 llegó a 5,38 Mtep en la UE, correspondiente a una cuota de 1,8% del consumo total de combustibles dedicados a transporte. Según el informe del mismo instituto (2006), a nivel mundial, Japón ocupa un importante lugar en la producción de células fotovoltaicas con un 24.6%, seguida muy de cerca por China (22%), por otra parte, la energía hidráulica figura como la fuente renovable de electricidad más importante y más utilizada en el mundo, representando un 19% de la producción total de electricidad, siendo Canadá el productor más importante de energía hidroeléctrica, seguido por los Estados Unidos y Brasil.

En España, por ejemplo, para el año 2012, las energías renovables aportaron (directa e indirectamente) al Producto Interior Bruto (PIB) “10.563 millones de euros, representando por primera vez un 1% del total nacional” [Asociación de Productores de Energía Renovable, 2012]. Según datos de la Asociación de Productores de Energía Renovable – APP, para ese mismo año, las empresas del sector de las renovables aportaron 580 millones en diversos impuestos y recibieron subvenciones por valor de 11 millones de euros. Los esfuerzos, si bien significativos, aún no son suficientes pues sigue siendo alta la dependencia energética existente. Según datos de la Agencia Tributaria, el déficit energético estuvo en 45.504 millones de euros. Efectivamente esta tendencia viene a la baja por la inversión que realiza el gobierno y la contribución

que hacen las empresas del sector de las energías renovables, en materia de investigación, desarrollo e innovación. Según este informe [Asociación de Productores de Energía Renovable, 2012] en el 2012 destinaron el 4.23% de su contribución total al PIB en I+D+i. Este dato es importante, dado que el gasto promedio en investigación y desarrollo en España es 1.30%, y la media de la Unión Europea es 2.03%, tal y como lo muestra la Figura 1.



Figura 1. Gasto en investigación y desarrollo de los países de UE
Fuente: [Banco Mundial; EL PAÍS, 2014]

Según las proyecciones realizadas por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía del Ministerio de Industria, Energía y Turismo de España “la aportación directa del sector de las energías renovables al PIB de España en el año 2015 superará los 9.903,9 millones de €, y alcanzará los 13.064,9 millones de euros en 2020, en términos constantes (€ reales del año 2010).” [Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía - Deloitte, 2011], cumpliendo con la visión de un país autosostenible y con el compromiso de la seguridad energética.

En América Latina existe un gran potencial para la generación de energías renovables. Dada su condición de región megadiversa, goza de importantes recursos hídricos, forestales y ecosistemas asociados. A pesar de ello, tal y como se observa en la Figura 2, la contribución de las fuentes no convencionales de energía renovable en la producción total de generación de energía eléctrica, todavía es muy pequeño (excepto el consumo de hidroelectricidad), por ejemplo, la geotérmica y eólica, no sobrepasan el 1% en el 2006 [Banco Interamericano de Desarrollo, 2010]. Para el año 2013, según datos de *BP Statistical Review 2013*, podemos observar que tanto la capacidad instalada como las inversiones en energías renovables han crecido de forma sostenida en los últimos años.

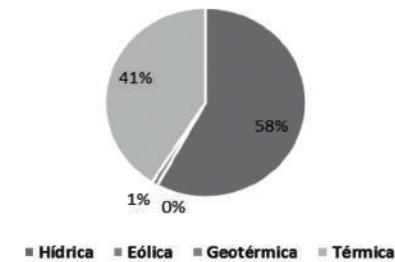


Figura 2. Fuentes de generación de energía % de la Capacidad Instalada (MW) América Latina y el Caribe
Fuente: [Banco Interamericano de Desarrollo, 2010]

El informe del [Instituto Real Elcano 2014] “*Energía en América Latina: recursos y políticas*” expone que el incremento en la capacidad total pasó de 11,3 GW en 2006 a 26,6 GW en 2012, con una tasa de crecimiento compuesta del 296% para todo el período. Según este informe (2014), en el año 2012 se pusieron en funcionamiento 3,3 GW de energías renovables y en materia de inversiones en energías limpias, el desempeño de la región resultó ser superior al de otras. Los datos de *BP Statistical Review 2013*, muestran que en 2012 la inversión en renovables en América Latina y el Caribe supuso el 6% del total mundial, alcanzando la suma de 268.7 billones de dólares y ampliándose la cuota del 5,7% del año anterior. Aunque Brasil sigue manteniendo la mayor parte de esas inversiones, el resto de América Latina creció de manera significativa, pasando de recibir el 11% de la inversión en 2011 al 45% de 2012. [Escribano & Malamud, 2014]. Por otra parte, en materia de política pública se han venido diseñando e implementando nuevas normativas y llevando a cabo planes de corto, mediano y largo plazo, así como también programas y proyectos que incluyen incentivos, subsidios, y financiación destinada al fomento de la producción de energía renovable, sustitución de fuentes fósiles por fuentes sustentables y la eficiencia energética.

A pesar del rezago de América Latina y el Caribe con respecto a otras regiones como Estados Unidos y Europa cuyos porcentajes de aportes en producción de energía a partir de fuentes renovables son mucho más significativos dentro del total mundial, el sector energético en Latinoamérica posee características importantes que merecen la pena enumerar. Una de ellas es que la región presenta un perfil energético diferenciado con respecto a otras regiones emergentes; por otra parte, “su matriz energética (y su base económica, salvo el caso de Venezuela) está más diversificada que la de Rusia y los países productores de Oriente Medio, Norte de África y Asia Central” [Escribano & Malamud, 2014] y por su condición de región megadiversa, cuenta a su vez con mayores recursos naturales que otras regiones del planeta.

3. EL DESARROLLO HUMANO Y RURAL SOSTENIBLE

Para la década de los años cuarenta y cincuenta el interés por la sustentabilidad era poco, la idea de crecimiento económico sin tener en cuenta el efecto en el deterioro de los recursos naturales y por ende, en las condiciones de vida de la población más vulnerable era el modelo predominante. Los preceptos de la teoría neoclásica, que establece al PIB como variable determinante del crecimiento y desarrollo de un país, difícilmente permitían abordar en los estudios de mercado de bienes y servicios, toda la complejidad que conlleva el progreso de las sociedades, principalmente los aspectos ecológicos que se interrelacionan con el crecimiento y el cambio tecnológico. Posteriormente, hacia los años setenta, los primeros problemas medioambientales serios, obligan a los países industrializados a que consideren reducir su ritmo de expansión [Paniagua & Moyano, 1996] y a intentar incluir el criterio de sustentabilidad en sus proyecciones de crecimiento; en ese sentido, la Conferencia de Estocolmo (1972), el Programa de las Naciones Unidas para la Protección del Medio Ambiente - PNUMA y la creación de la Comisión Mundial del Medio Ambiente y Desarrollo - CMMAD (1983) marcaron el camino hacia la búsqueda de estrategias para el cambio teniendo como base un modelo de desarrollo sustentable. En 1987, el reporte de la Comisión conocido como *Informe Brundtland* ofreció una definición para el desarrollo sustentable, que se convirtió en punto de referencia, al concebirlo como aquel que “satisface las necesidades de la generación actual sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades» [Comisión Mundial del Medio Ambiente y Desarrollo - CMMAD, 1987]. Este informe y posteriormente, la Cumbre de la Tierra que dio como resultado la elaboración de *la Agenda 21*, constituyeron un referente clave que ha servido de base para posteriores ajustes, nuevas adjetivaciones y construcciones complementarias, alrededor del concepto de la sustentabilidad del desarrollo.

En la actualidad, alrededor de la sustentabilidad, podemos encontrar varias escuelas de pensamiento ecológico dentro de las ciencias sociales; tal y como lo explica [Tetreault 2008] las más destacadas serían cinco: *a.* el modelo de desarrollo sustentable según la propuesta realizada en el Informe de Brundtland y la Agenda 21, que es el predominante a nivel mundial; *b.* la economía ambiental que intenta introducir consideraciones ecológicas en la teoría neoclásica; *c.* la economía ecológica, que incorpora un análisis de flujos de energía, enfocándose especialmente en las limitaciones que tiene el enfoque de la economía ambiental; *d.* la ecología política, que intenta analizar la dinámica socioeconómica e interrelacionarla con los problemas ambientales, haciendo especial énfasis en el estudio de las relaciones de poder entre diferentes actores y grupos

sociales; y *e.* la agroecología que busca recuperar y promover el desarrollo de los aspectos positivos de la producción campesina tradicional [Tetreault, 2008].

Los criterios ecológicos del desarrollo tienen como fin la creación de un espacio adecuado para el bienestar del ser humano, en la medida en que éste se relaciona con el entorno y examina sus posibilidades en función del territorio y de las libertades individuales que posee. En ese sentido, el desarrollo puede definirse como:

“...Un proceso de expansión de las libertades reales de que disfrutan los individuos. El desarrollo exige la eliminación de las principales fuentes de privación de la libertad: la pobreza y la tiranía, la escasez de oportunidades económicas y las privaciones sociales sistemáticas, el abandono en que puedan encontrarse los servicios públicos y la intolerancia o el exceso de intervención de los estados represivos” [Sen, 2000]

El énfasis entonces debe ser puesto en cada habitante del territorio y en el reconocimiento del conjunto de valores naturales, ambientales y culturales que le circunda. Bajo este esquema, “el ser humano debe ser el sujeto activo y la finalidad última del desarrollo, en consecuencia, se ubica al desarrollo humano como elemento central de la sustentabilidad” [Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2013]. El Desarrollo Humano Sostenible se entiende entonces como el desarrollo integral de los seres humanos en armonía con los ecosistemas [Rendón, 2007]

En el “mundo rural”, la discusión sobre el concepto de sustentabilidad y su alcance reviste especial importancia. La sustentabilidad en la ruralidad debe ser concebida “como una nueva forma de hacer las cosas” lo que incluye “nuevos ámbitos de gestión al estado del arte en una comunidad o región, que permita mejores resultados que los modelos tradicionales, y mediante lo cual se promueva y fortalezca la participación de la comunidad y de sus actores sociales” [Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2012]. Hasta hace poco, se concebía “lo rural” como un espacio donde confluyen la marginalidad, la precariedad y las personas se caracterizan por un alto índice de necesidades básicas insatisfechas. Esta percepción así descrita incurre en imprecisiones, dado que las situaciones de precariedad no son intrínsecas al sector rural sino que resultan como consecuencia de otro conjunto de situaciones, entre las que se pueden señalar, la ausencia del estado, una baja inversión, y la presencia de conflictos sociales. En ese sentido, se plantea un desafío de cambio, un nuevo modelo de pensamiento y una nueva visión para el sector rural. La nueva ruralidad se concibe como:

“Una forma de reconsiderar el desarrollo rural en términos de una variedad de metas normativas tales como lograr reducir la pobreza; la sustentabilidad ambiental; la equidad de género; la revaluación del campo, su cultura y su gente; facilitar la descentralización y la participación social; superar la división rural-urbana, y garantizar la viabilidad de la agricultura campesina”. [Kay, 2009.]

En palabras de Bengoa (2006) [citado por Kay, 2009] para que exista una ‘nueva ruralidad’ deben producirse cambios fundantes de importancia, nuevos sujetos, nuevas relaciones productivas. Lo cierto es que la agricultura tradicional ha sido por mucho tiempo la que ha marcado el rumbo del progreso de los habitantes de estas zonas. Si bien, este modo de producción genera empleo e ingreso a los campesinos y sus familias, no es la única actividad que puede realizarse. Las características de los territorios rurales presentan potencialidades para otras actividades que no tienen que estar vinculadas a la agricultura. Algunas de las más relevantes en la actualidad, son la producción de energía renovable y el turismo comunitario. Estas nuevas actividades se fundamentan en la base del reconocimiento de los activos naturales, ambientales y culturales del territorio como potencialidades para el progreso de la población local

En el contexto de América Latina, “las definiciones censales de “urbano” y por descarte de “rural” en los años sesenta contribuyeron a una subestimación de lo “rural”, identificándola como un continente muy urbanizado”, [Comisión Económica para América Latina y el Caribe - CEPAL, 2011] este hecho ha incidido en las decisiones asociadas a los planes de desarrollo de los gobiernos y la cooperación internacional. En esta región, el mundo rural es un espacio donde confluyen el “mayor número de contradicciones, complejidades, conflictos y confusión en las políticas públicas” [Comisión Económica para América Latina y el Caribe - CEPAL, 2011] y en los aspectos relacionados con la sostenibilidad.

La pobreza ha sido el factor preponderante en el espacio rural y la ausencia del estado cuyas políticas favorecen a medianas y grandes empresas, dejan al descubierto el sector rural a pequeña escala, existiendo una polarización que favorece solo a los poseedores de grandes capitales. [Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la agricultura, 2013]. A pesar de esta realidad, también es importante resaltar que los gobiernos de diferentes países de la región, la empresa privada y la sociedad civil han venido realizando esfuerzos, aunque de forma no homogénea sino más bien fraccionada, para que la ruralidad latinoamericana se transforme de manera significativa durante las últimas dos décadas, “con cambios importantes en la estructura productiva, en las dinámicas territoriales, en la visión de lo ambiental y en los esquemas de gobernabilidad” [Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2013] estableciendo un marco para el desarrollo rural sostenible, bajo el esquema de un trabajo colectivo.

En Colombia, si bien, “aún no se ha discutido seriamente ni se ha hecho una reflexión consistente sobre el tipo de institucionalidad requerido para atender la problemática del campo y crear las condiciones institucionales que garanticen una estabilidad en el crecimiento y el desarrollo rural” [Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo, 2011], no se puede ignorar que desde el gobierno nacional se han venido estableciendo un marco legal de políticas de desarrollo rural basada en los territorios y por otra parte, en incentivos y promoción a diversas actividades asociadas al desarrollo rural, como son el turismo comunitario y la producción de energías renovables, aprovechando los abundantes

recursos naturales y renovables propios. Aunque faltaría una mejor articulación, reconociendo la incidencia que tiene una actividad en la otra, se pueden verificar casos exitosos de este binomio y lecciones para tener en cuenta.

Energías renovables para el desarrollo humano y rural sostenible

Las energías convencionales de origen fósil se caracterizan por ocasionar daños en el medio ambiente; agotarse en el tiempo; tener precios altos, dadas las características del producto y el mercado (específicamente la escasez relativa de naciones productoras y la demanda mundial creciente) y contribuir a la contaminación por emisión de gases de efecto invernadero, aspectos que finalmente ocasionan un detrimento en las condiciones de vida del ser humano. Por otra parte, un país dependiente de la importación de energía asume riesgos importantes relacionados con esa dependencia, entre ellas, la inseguridad del suministro y las bajas reservas que podrían tener consecuencias sociales internas graves. Ante estos hechos, en la actualidad puede decirse que existe una conciencia creciente en los cambios, a veces irreversibles, que el progresivo deterioro del medio ambiente provoca y que “pueden afectar seriamente las posibilidades de desarrollo futuro de la sociedad” [Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2013] y existe una claridad meridiana de los riesgos que suponen para un país, la dependencia energética. Bajo este contexto, las energías renovables, por sus características, cumplirían con los criterios que permiten contribuir en la solución a las dificultades planteadas, contribuyendo a la sustentabilidad del desarrollo, debido a que son inagotables o permiten su renovación en períodos cortos de tiempo; son menores los daños a los ecosistemas y ambientes naturales, y en la gran mayoría de los casos se trata de recursos propios por lo que se reduce la dependencia energética respecto de terceros países y además se contribuye a la generación de riqueza y empleo a los hogares [Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía - Deloitte, 2011]. Ahora bien, una estrategia energética, para que resulte compatible con el desarrollo sustentable del sector rural, debe suponer el mejoramiento de forma equilibrada de todos los indicadores [Organización Latinoamericana de Energía - Naciones Unidas, 2003].

Tal y como lo expresan [Burguillo & del Río 2008] tienen lugar evidentes sinergias entre las políticas de desarrollo rural, la política de cambio climático y la política energética. Como podemos observar en la Figura 3, los proyectos de energía renovable para el sector rural, contribuyen a articular todas las estrategias de desarrollo para las comunidades rurales, de manera sostenible. Ante la necesidad cada vez más acuciante a nivel mundial de superar la pobreza y la vulnerabilidad

humana mayormente concentradas en las comunidades rurales, el impulso a la diversificación de la matriz energética se constituye en una estrategia para la superación de éstos y otros problemas sociales en tanto y en cuanto el espacio rural aparece como proveedor de energías renovables.

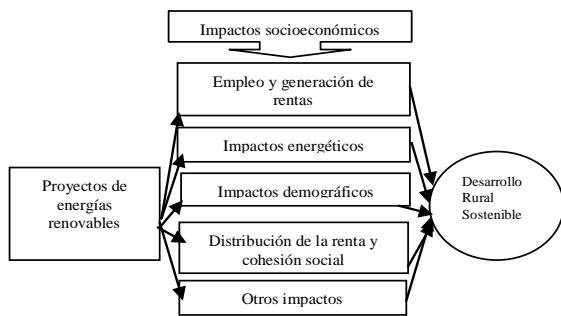


Figura 3. Impacto de la implantación de las energías renovables en el desarrollo sostenible rural (dimensiones económica y social)

Fuente: Tomado de [Burguillo & del Río, 2008]

Realizando un breve análisis por regiones, para revisar el contexto, se observa primeramente, que en Europa, se concibe la sostenibilidad como política de desarrollo rural y plantea objetivos en cuanto a crecimiento, creación de empleo y mejora en los medios de vida de las comunidades, que apuntan al desarrollo de nuevas áreas para la recreación, turismo, vivienda, trabajo, inversión en tecnología y la preservación de los recursos naturales que son muy importantes en la cultura europea. [Cardín, 2010]. La inversión en energías renovables es cada vez más creciente pues este sector se ha constituido en un motor de crecimiento económico y de desarrollo territorial. La ayuda para el desarrollo con estos fines, se impulsa y promueve desde la Unión Europea. Entre el 2007 y el 2011, a través de la Oficina de Cooperación de la Comisión Europea, se llevó a cabo la iniciativa *Euro – Solar*, cuyo objetivo buscaba principalmente impulsar las energías renovables como “motor de desarrollo humano en ocho países menos favorecidos de América Latina”. Financiando el 80% del proyecto que incluía “el diseño e instalación de 660 kits de producción de energía eléctrica basados en 100% en fuentes renovables” [Unión Europea, 2011] los beneficiarios finales resultaron ser más de 300.000 habitantes de comunidades rurales de los países de Guatemala, Honduras, Nicaragua, El Salvador, Ecuador, Bolivia y Paraguay.

Con respecto al continente asiático, según los datos de la Agencia Internacional de la Energía - AIE, allí se encuentran los niveles más altos de demanda de energía; países como China e India, se convertirán en 2020 en los mayores importadores de petróleo y carbón, respectivamente [International Energy Agency, 2013].

Esta región, sin embargo, se encuentra realizando esfuerzos para reducir la dependencia energética. China ocupa el tercer puesto con mayor número de aerogeneradores (15,7%) e India ocupa el cuarto en el mundo como productor de energía eólica. Para 2006, Turquía contaba con unos 10 millones de m² de captadores solares, y China, 78 millones, lo que supone el 40% de todos los instalados en el mundo [Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas – CIEMAT, 2008]. En el informe del CIEMAT, según datos del 2007, entre los líderes en la producción de células fotovoltaicas, también se encuentra China (22%), por detrás de Japón (24,5%) y la Unión Europea.

La situación en África es singular. Por diversos factores políticos, sociales, económicos que no es objeto del presente artículo entrar a dilucidar, se pueden encontrar extensos territorios cuyas características permitirían la puesta en marcha de proyectos de producción de energía renovable; sin embargo, según el Informe de la Agencia Internacional de la Energía (2013), pese a la abundancia de recursos, y las iniciativas realizadas por la Comunidad Económica de Estados de África Occidental, la utilización per cápita de la energía seguirá manteniéndose en niveles muy bajos.

Por otra parte, en las regiones de África y Asia, se concentra el mayor número de personas (más de 1200 millones, poco menos del 20 % de la población mundial), que no tienen acceso a luz eléctrica [Banco Mundial, 2014] principalmente en zonas rurales. El desabastecimiento de energía y la mala calidad debido a la falta de inversiones son grandes desafíos que enfrentan los países en desarrollo. Esta realidad hace que la cooperación internacional tenga un papel fundamental en el progreso de las comunidades que integran estas zonas. A través de la financiación externa (ayudas y subvenciones) se ofrece apoyo a la investigación e innovación en sistemas de energía para el sector rural con un énfasis en fuentes renovables (como energía hidroeléctrica, eólica, solar y geotérmica). Una de las experiencias positivas de ayuda al desarrollo, en el marco de la contribución de las energías renovables al progreso de las comunidades rurales, se ubica en el departamento de Dagana y Podor, al norte de Senegal, a través de un proyecto financiado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura que buscaba ayudar a los cultivadores de productos hortícolas a través del uso de energía solar (panel solar fotovoltaico) para la extracción de agua del río a través de una bomba y se brindaba la capacitación técnica a los aldeanos sobre estudios agrarios [Best, Van Campen, & Guidi, 2000]. Otra experiencia exitosa que describen (Guide, Best et al. 2000] se sitúa en Bangladesh en donde Grameen Shakti, una institución financiera muy importante en materia de crédito para los pobres, fundada por Muhammad Yunus, apoyó en 1996, con fondos proporcionados por USAID, la promoción y comercialización de sistemas solares fotovoltaicos para la electrificación rural de pequeñas empresas de Bangladesh, el resultado se vio reflejado en la mejora de los ingresos, “ya que el horario de trabajo más prolongado por causa del acceso energético permitió crear más empleos, producir mayor volumen y mejorar la condición social de las personas”, especialmente, a las mujeres que tuvieron mejores condiciones para el tejido de canastos y la

costura, también se ampliaron los horarios de estudio de los niños y jóvenes. Para 2002, solo 7000 hogares usaban paneles solares en Bangladesh. Actualmente, más de 1,4 millones de viviendas rurales tienen electricidad a través de los paneles fotovoltaicos [Banco Mundial, 2014].

En cuanto a América Latina, la crisis de los ochenta impulsó cambios importantes en los sistemas económicos de la región para adaptarse al nuevo contexto internacional. Este cambio significó transformaciones de fondo y reorganización en el ámbito institucional, que produjeron la enajenación de los activos de las empresas públicas. Específicamente en el sector energético, se presentaron procesos de reforma muy importantes, para lograr, entre otras cosas, una mayor participación del mercado y la viabilidad de la inversión privada. [Organización Latinoamericana de Energía - Naciones Unidas, 2003]. En este proceso de transformación bajo un nuevo enfoque de las políticas energéticas, se sumó una nueva responsabilidad de carácter transversal, bajo el marco de que la economía como ciencia necesita adaptarse de igual manera que los modelos económicos con el fin de contribuir a la sustentabilidad del planeta, esto es, la responsabilidad con el medio ambiente,

Los resultados desalentadores en materia de contaminación, emisión de gases de efecto invernadero y destrucción de los recursos naturales, dejaban al descubierto que “no hay respuestas en las ramas tradicionales de la economía para la problemática ambiental.” [Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 1995]. Así las cosas, el compromiso de la región no podía circunscribirse únicamente al crecimiento económico, sino también debía formular políticas públicas y crear planes de actuación teniendo como base la concertación con los actores representativos de las comunidades, para solucionar los problemas vinculados con la equidad y la preservación de su riqueza natural, a través del cuidado del medio ambiente. En este punto de inflexión, el cambio de la cultura ambiental debería también ser capaz de modificar los paradigmas científicos para signar las ciencias en función de la supervivencia del planeta como ente viviente. [Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 1995]. Bajo este contexto, el proceso de internalizar el impacto ambiental en el progreso económico contribuye a generar todo un proceso de revalorización de los recursos naturales y culturales como activos del territorio. Una de las propuestas más importantes para cumplir con estos objetivos es la sostenibilidad energética dada su contribución a un futuro estable. Las acciones encaminadas en este sentido, significaron un paso adelante en el camino correcto.

En 1997, la Comisión Económica para América Latina y el Caribe - CEPAL, la Organización Latinoamericana de Energía - OLADE y la Agencia Alemana de Cooperación Técnica – GTZ (por sus siglas en inglés) en 1997 elaboraron ocho indicadores de sustentabilidad energética, estos son, a. Autarquía energética; b. Robustez frente a cambios externos; c. “Productividad” energética; d. Cobertura eléctrica; e. Cobertura de necesidades energéticas básicas; f. Pureza relativa del uso de energía; g. Uso de energías renovables; h. Alcance recursos fósiles y leña. A cada indicador le corresponde unos objetivos que responden a las necesidades, problemáticas

e impacto de la producción y uso de la energía en la dimensión social; económica; ambiental y de recursos naturales. Con el tiempo han surgido nuevos métodos e índices para medir la sustentabilidad energética, sin embargo los conceptos enumerados dejaron una base clara acerca de los términos en que debe ser concebida la estrategia energética de un país para que aporte a la sustentabilidad del desarrollo, de acuerdo con las características y potencialidades del territorio.

En el contexto de Colombia, el suministro de energía a partir de fuentes renovables no convencionales ha sido lenta [Cadena, et al., 2008]; sin embargo, cada vez se tiene mayor interés porque las energías alternativas o renovables puedan llegar a zonas rurales. El ministerio de minas y energías, de la mano del Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energética para las Zonas No Interconectadas- IPSE, se encuentran ejecutando varios proyectos enfocados en el área rural del país con este objetivo [Cardín, 2010]. Entre ellos, el proyecto de sistema híbrido solar –diésel para la comunidad de Titumate en el Municipio de Urdaneta en el departamento del Chocó [Organización Latinoamericana de Energía - Naciones Unidas, 2003]; de igual forma, el proyecto de Barí en Tibú - Norte de Santander, cuyo objeto es beneficiar a más de 500 familias en el lugar a través de la implementación de un sistema solar fotovoltaico [Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas, 2014].

4. TURISMO RURAL COMUNITARIO

La contribución del turismo al desarrollo local de una comunidad hace que esta actividad sea una de las apuestas más importante de no pocos países en el mundo. La actividad turística no es sólo una fuente de ingresos que genera crecimiento económico, sino, es un motor de progreso para la población, ya sea en entornos rurales, urbanos, silvestres o de sol y playa. De acuerdo con estas características, el desarrollo turístico mundial, ha venido incluyendo nuevos conceptos: “Turismo de base comunitaria”, “Turismo Indígena”, o “Turismo Comunitario”; que hacen referencia a las percepciones recogidas según el territorio, la actividad, el tipo de turistas y visitantes, en la cual se han ido incorporando nuevos actores de la actividad turística, como lo son: comunidades indígenas, campesinas y urbanas [Cox, 2009] afrodescendientes, y en general, la comunidad local.

El turismo comunitario es “un tipo de turismo de pequeño formato, establecido en zonas rurales y en el que la población local, a través de sus estructuras organizativas, ejerce un papel significativo en su control y gestión.” [Gascón & Cañada, 2005], “los miembros de la comunidad son los dueños, gestores y beneficiarios de la iniciativa, participan activamente en la autogestión de

los recursos con el objetivo de lograr equidad social.” [Pacheco, et al., 2011].

La sostenibilidad del turismo comunitario en comunidades rurales

El turismo rural tiene sus inicios en Europa como resultado de la crisis en la agricultura de los años 60, que trajo como consecuencia la emigración masiva de los agricultores a la ciudad dejando las zonas rurales casi despobladas. [Leal, 2008]

Para los países en vía de desarrollo, el turismo rural de base comunitaria tiende a ganar cada vez más relevancia por las oportunidades que genera a un sector de la población generalmente desfavorecido y en condiciones significativas de precariedad. Ahora bien, dada las características del entorno rural, es de gran importancia conjugar las actividades turísticas con los criterios de sostenibilidad. Desde los años setenta se han comenzado a estudiar con especial énfasis, las evidencias de los efectos del mercado del sector del turismo en las comunidades rurales y el medio ambiente y no pocos arrojaron resultados desfavorables [Ash y Turner 1976, citado por Rojas b, 2005]. La destrucción de los ecosistemas; las incompatibilidades entre la identidad de la comunidad y la gestión de la actividad turística; el desplazamiento de los habitantes de la zona; la poca o nula participación de la comunidad local que no permite la generación de nuevos ingresos en la población y por tanto no experimentan mejoras en sus condiciones de vida y la falta de planificación desde las administraciones, son algunos de los efectos negativos del turismo. Debido a ello, la Organización Mundial del Turismo (OMT) en la “Conferencia Euro-Mediterránea

sobre turismo y desarrollo sostenible (1993), toma como base el Informe de Brundtland y define el turismo sostenible, con las siguientes características:

Satisface las necesidades de los turistas y regiones anfitrionas presentes, al mismo tiempo que protege y mejora las oportunidades del futuro. Está enfocado hacia la gestión de todos los recursos de tal forma que se satisfagan todas las necesidades económicas, sociales y estéticas al tiempo que se respeta la integridad cultural, los procesos ecológicos esenciales, la diversidad biológica y los sistemas de apoyo a la vida.

Se debe planificar la oferta de los activos naturales del territorio (el uso de espacio y recursos naturales); la infraestructura y logística (alojamiento, transporte y alimentación básica) y el cuidado de los ecosistemas (reducción de contaminación, emisión de gases, tecnologías limpias, utilización de fuentes renovables de energía), que serían los aspectos **básicos** detallados en la Tabla 1. Sin embargo, la sostenibilidad también incluye otros, tales como, la planificación en el cuidado de los activos culturales (patrimonio, museos, costumbres, etc.) y lo relativo a la seguridad humana (mitigación de riesgos a la salud y bienestar de las personas); este último de competencia en mayor medida de la institución pública local. En ese orden de ideas, Rojas expresa lo siguiente:

“El Turismo Sostenible desde la perspectiva social debe orientarse a equilibrar los costos y beneficios del desarrollo de la actividad entre los actores involucrados y generar oportunidades para la comunidad anfitriona (la población local y regional), de manera que se maximicen los impactos positivos y se eviten, o reduzcan al mínimo, los impactos negativos y, si esto no se logra, puedan ser compensados de forma adecuada”. [Rojas, 2005].

El crecimiento económico por causa del turismo debe reflejarse en un aumento de las oportunidades para el mejoramiento de las condiciones de vida de las comunidades locales. Al proveerse

DIMENSIONES	Social	Económica	Ambiental	Político - Institucional
ASPECTOS QUE INVOLUCRA	Equidad; diversidad cultural; patrimonio natural; desarrollo social; gobernabilidad; transparencia y rendición de cuentas; democracia y participación	Uso y acceso a incentivos (tributarios, fiscales y parafiscales); beneficio y rentabilidad; tamaño, características y nichos del mercado; certificaciones de sostenibilidad; innovación y demanda sostenida del producto turístico.	Efectos sobre la capacidad natural de restauración; intensidad de la demanda; uso y consumo de recursos naturales; producción y vertimientos de desechos.	Regulación y control.
FUNDAMENTOS	Generación, fortalecimiento y ampliación de capacidades. Prevención de ocurrencia de impactos negativos que ocasionen cambios en la estructura social y productiva y en los hábitos, modos de vida y costumbres.	La complementariedad de las actividades turísticas, actividades económicas de la comunidad; sinergias y encadenamientos productivos.	Efectos directos e indirectos del proceso de oferta y demanda del mercado de bienes y servicios turísticos, en el medio ambiente.	Normativa y acreditaciones; planes de desarrollo y programas.

Tabla 1. Las dimensiones de la sostenibilidad en la actividad turística

Fuente: Elaboración propia con datos (Rojas, 2005b) y (Comisión Económica para América Latina y el Caribe - CEPAL, 2011)

formación adecuada para el incremento de las capacidades de las personas en sus áreas de actuación y al convertirse la población en un agente prestador de servicios, actuando de guías turísticos, hospedadores, operadores del transporte, oferentes de la gastronomía local y productos artesanales, se obtendrá como resultado la diversificación de las actividades económicas existentes en la zona y mejorará la calidad de productos y servicios, lo que incrementaría la demanda hacia los productos artesanales, las actividades culturales, el comercio y la gastronomía del territorio, trayendo como consecuencia un mayor dinamismo de la economía local. Bajo el esquema de un círculo virtuoso del mercado, al contar con una política pública que favorezca la infraestructura, establezca los requisitos de seguridad civil necesaria, gestione eficientemente el cuidado y preservación de los ecosistemas y el medio ambiente; entonces, las actividades de turismo comunitario rural complementado con el uso de las fuentes renovables de energía, generarán empleo y aumentarán la cantidad de dinero disponible para el consumo y el gasto en el territorio, constituyéndose la base para consumar el desarrollo humano sostenible. El Turismo comunitario en el ámbito rural es “una actividad económica importante, estratégica y que sustentablemente administrada puede conllevar a un desarrollo social” [Pacheco, et al., 2011],

5. ENERGÍA RENOVABLE Y TURISMO RURAL PARA EL DESARROLLO HUMANO SOSTENIBLE. CASOS EN AMÉRICA LATINA

A nivel mundial, las experiencias relevantes de energías renovables en el turismo comunitario no son recientes, y aunque los beneficios, como veremos, generalmente son mayores que los efectos negativos, estos no pueden desconocerse. Por ejemplo, en Reino Unido (Cemmaes, centro de Gales), se encuentra un parque eólico abierto a visitantes nacionales y extranjeros. Los beneficios han sido positivos, sin embargo, ha habido descontento por los ruidos de las turbinas que afectan a las personas y se interponen en la ruta de algunas aves [Carver y Page, 1994 (citado por Schlüter, 1996)]. En España, una iniciativa de la empresa privada para la Localidad de Laviana en Asturias ha permitido que las casas rurales estén equipadas con paneles solares y estufas de biomasa para la calefacción y calentamiento de agua sin hacer uso de fuentes fósiles [Rodríguez, 2011]. El beneficio ha sido positivo, tanto para los visitantes y turistas como para las comunidades aledañas y el medio ambiente.

5.1 América Latina

Bolivia el turismo indígena y comunitario se ha mostrado como un sector promisorio para el desarrollo económico y social del país. Por medio de la aplicación de la energía solar, se busca mejorar la calidad del servicio ofrecido a los visitantes. Son muchas las ventajas ya que en el área rural de este país los campamentos y albergues turísticos se encuentran en lugares remotos, el acceso a la provisión de energía eléctrica de la red pública es muy difícil y en algunos casos simplemente es inexistente. Bajo este contexto, la aplicación de energía solar ha venido a constituirse en una alternativa económica para la solución de estos inconvenientes y para incentivar la demanda del turismo rural. [Ferrel, 2007]. En el

Desierto Salar de Uyuni, en el departamento de Potosí, con el apoyo de Energética e Ingeniería sin fronteras (isf) y la Comunidad de Madrid, se instalaron, sistemas fotovoltaicos para provisión de energía eléctrica; sistemas termosolares para calentamiento de agua; y cocinas eficientes de leña. Este suministro de energía beneficia a los albergues, campamentos y centros de atención al turista; a los grupos indígenas y familias campesinas y mejora la economía microempresarial turística y medio ambiental. [Gutiérrez, 2007]. En la comunidad de San José de Uchupiamonas, la comunidad indígena gestionó su propio desarrollo, a partir de los valiosos recursos naturales y culturales presentes en su territorio. Con el apoyo de la ONG Conservación Internacional y el Banco Interamericano de Desarrollo – BID, recibió los recursos que permitieron impulsar el proyecto turístico ecológico y comunitario de carácter sostenible. En ese sentido se dispuso la instalación de un sistema de energía solar generada por paneles solares para el albergue Ecológico Chalalán. Los beneficiados de este proyecto han sido los grupos indígenas de la comunidad, ya que son ellos los que gestionan y administran todo el programa, mejorando sus ingresos, la calidad del empleo, y siendo autosostenibles. Con sus prácticas de gestión de residuos, cuidado del medioambiente y energía limpia, se minimizaron los impactos sobre el patrimonio natural y paisajístico del lugar donde se estableció, [Del Barco, 2010];

En Ecuador, a través de la Empresa Privada (Canodros S.A.) y la Federación Nacional Achuar se llevó a cabo un proyecto para instalar 64 paneles solares de 75W en sitios remotos de la Amazonía Ecuatoriana, específicamente en la reserva ecológica Kapawi Ecolodge para cubrir las necesidades eléctricas del lugar en un 60%, beneficiando de esta forma a los grupos indígenas de la comunidad achuar quienes fueron capacitados para garantizar la operatividad de la reserva, del hotel y de las instalaciones. Toda la infraestructura está dispuesta de modo que garantice el mínimo impacto al medio ambiente, el ahorro en el uso de los recursos naturales, y la convivencia armoniosa con la población local. Los visitantes participan de las actividades de la comunidad achuar, aprendiendo la cultura y la elaboración de las artesanías. [Del Barco, 2010]

Las islas Galápagos declaradas patrimonio de la humanidad por la [UNESCO 1979] y Reserva de la Biosfera (1985) constituyen un ecosistema muy importante a nivel mundial que se encuentra protegido como parque nacional de Ecuador desde el 1959. Uno de los factores de riesgo para la sustentabilidad ambiental de esta isla estaba en el uso de diésel para generación de energía eléctrica, el cual al ser transportado por vía marítima, los eventuales derrames del combustible contaminaban los recursos naturales. Estos aspectos y el inadecuado manejo en la gestión de la isla dieron como

resultado que estuviese bajo riesgo ambiental. Varias han sido las iniciativas para mejora y mitigación de riesgos, en las que han participado el gobierno nacional y local y la comunidad. Una de ellas, la inversión en energía eólica a partir de molinos de viento y energía solar a partir de paneles solares que favorece y mejora las condiciones para el turismo local y la preservación del medio ambiente en la zona. Además de la comunidad de las Islas Galápagos, entre los beneficiados también se cuentan los visitantes que practican el ecoturismo en la isla [Universidad San Francisco, 2010]. Otra apuesta es el programa ENERGAL de cooperación alemana que hace parte de la iniciativa del Gobierno ecuatoriano y la comunidad local de “Cero combustibles fósiles en las Islas Galápagos”, una política que pretende reemplazar hasta el 2020, el uso de derivados del petróleo por energías renovables. El programa en materia de inversión, capacitación y acompañamiento para la obtención de biocombustibles a partir del piñón (Jatropha Curcas). [Heinemann, 2014].

En Argentina existen proyectos en donde la energía renovable se convirtió en atractivo turístico. En la localidad de Rio Mayo Departamento Río Senguer, por iniciativa del Centro Regional de Energía Eólica (CREE) secretaría de energía nacional, la provincia del Chubut y la universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, se instaló un parque eólico (generador instalado: 4 Aeroman (30 Kw) y Potencia: 120 Kw) que dejó de estar en funcionamiento en 1995, sin embargo, se constituyó para visitantes nacionales y extranjeros, en atractivo turístico [Schlüter, 1996].

En Chile, la construcción del Sendero Turístico de Chile que tiene su base en la cordillera de los Andes, es un macroproyecto liderado por el Programa para el Desarrollo de Naciones Unidas – PNUD y la Comisión Nacional del Medio Ambiente – Conama. Se busca fomentar el ecoturismo, la práctica del montañismo y conocimiento de las personas del valor del patrimonio natural. En esta iniciativa se instaló un sistema de energía solar que beneficia con iluminación, calentamiento y bombeo de agua a las comunidades aledañas [Breceda, et al., 2007].

En México, se han realizado varias iniciativas de micro-generación energética como estrategia del desarrollo rural para contribuir a mejorar el estado de los recursos hídricos. Se cuenta también con la instalación de sistemas solares y eólicos bajo la participación activa del gobierno nacional y local. Por ejemplo, se instaló un sistema eólico (YumBalam) en la costa norte de Yucatán que provee energía a las cabañas de estilo maya dispuestas para fines turísticos y favorece a los visitantes que practican el ecoturismo [Romero, 2006].

5.2 Colombia

En Colombia, “el proyecto de ley general agraria y de desarrollo rural presentado por el gobierno, plantea abordar la ruralidad desde un enfoque integral del territorio, a partir del cual, el uso adecuado del suelo deberá garantizar la competitividad y la productividad.” [Planeta Paz, 2012]. El turismo rural comunitario es una iniciativa que desde diferentes actores, incluyendo la autoridad política local y nacional, se ha venido estructurando, aunque todavía se encuentra en su fase inicial. En ese sentido, en el país existen también otras actividades turísticas (ecoturismo, turismo de naturaleza) que pueden no tener todas las características del turismo comunitario, pero despiertan gran interés y mejoran las condiciones de vida de los habitantes de la población. En la medida en que, tanto hombres como mujeres, a través del emprendimiento, usan los “activos no tradicionales” (como los culturales) y los ambientales como método para generar ingresos; se transforma el uso del espacio rural y se deja de lado el mantenimiento del *status quo* tradicional. [Naciones Unidas, 2013]. A continuación se describen varias experiencias.

En el departamento del Chocó, el Parque Nacional Natural de Utría **ofrece** un espacio idóneo para la práctica del ecoturismo. Desde el gobierno nacional, a través del Ministerio de Industria y comercio, la Unidad de parques nacionales y el IPSE, procedió a la implementación de sistemas solares fotovoltaicos de generación eléctrica para cuatro cabañas, el centro de interpretación, auditorio, y la estación de telecomunicaciones, beneficiando a las comunidades aledañas y a los visitantes del parque [Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas, 2014].

El departamento de Santander entregó recursos para invertir en un sistema de energía de solar (paneles solares) para beneficiar a los visitantes del Parque Nacional del Chicamocha. Los beneficiarios de esta iniciativa han sido los practicantes del ecoturismo y las comunidades aledañas [El tiempo, 2013].

En el departamento de Bolívar, se encuentra la ciénaga de cholón a unos minutos de Cartagena, que cuenta con una casa navegable para alojar máximo a 6 huéspedes y que ofrece la posibilidad de observación privilegiada de la fauna y flora del lugar. En este territorio con la colaboración de la empresa privada, se diseñó un sistema de iluminación con energía solar totalmente autosuficiente que beneficia a habitantes de la comunidad de Barú y visitantes. (Proexport Colombia, s.f.). En Isla Fuerte, una comunidad conformada principalmente por afrocolombianos y raizales, su variedad marina y su riqueza natural, entre ellas, el Matapalo, conocido como “el árbol que camina”, que puede vivir hasta 500 años, permanecieron olvidados durante más de 25 años. Hasta que en 2006, el Gobierno Nacional se compromete a viabilizar un proyecto energético para la isla y sus habitantes. En la actualidad se cuenta con un parque de generación híbrido Solar – Diesel; el centro educativo, el puesto de salud y el centro de acopio, se benefician de la energía generada por los sistemas fotovoltaicos instalados y el restaurante y la biblioteca del colegio poseen estructuras bioclimáticas que ofrecen un ambiente de confort térmico [Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones

Energéticas para las Zonas No Interconectadas, 2013]. A raíz de este proyecto, las energías renovables implementadas fueron el soporte para la generación de un turismo sostenible y comunitario, incrementando los ingresos de la isla. Los turistas se interesaron en conocer los valores naturales y la riqueza histórica y cultural de sus habitantes, otorgándole la relevancia que merece como destino turístico rural

En el departamento de la Guajira, funciona un Parque Eólico experimental, una iniciativa de las empresas públicas municipales de Medellín. Está ubicado en el Cabo de la Vela y Puerto Bolívar y se encuentra abierto a visitantes nacionales y extranjeros. El objetivo está enfocado a la dinamización de la economía local y el mejoramiento de las condiciones de vida de la comunidad Wayuu especialmente. La ruta por el parque permite la observación participante de la cotidianidad de la comunidad Wayuu y conocer más de cerca los productos artesanales que elaboran. Vale la pena señalar que la comunidad Wayuu ha manifestado en varias ocasiones que se vulneraron aspectos relacionados a su cultura y alimentación, al momento de colocar en marcha el proyecto [Empresas Públicas de Medellín, 2014].

6. SINTESIS

Los fundamentos teóricos analizados y las experiencias descritas en este trabajo constituyen una evidencia de que el turismo rural comunitario y las fuentes de energías renovables pueden funcionar como una apuesta conjunta que contribuye al objetivo de desarrollo humano sostenible de las comunidades del sector rural. El análisis se centró en las cuatro dimensiones de la sustentabilidad. Con respecto a la dimensión cultural, los visitantes interesados en disfrutar de la naturaleza megadiversa, y participar de los estilos de vida de la población local rural, interactuando con su cultura, su patrimonio tangible e inmaterial, están dispuestos a pagar más si las instalaciones cuentan con energía renovable, además de las posibilidades que ofrece como elemento de atracción adicional [Schlüter, 1996]. En cuanto a los aspectos socioeconómicos, el fortalecimiento de las capacidades de las comunidades rurales para una participación activa en las actividades turísticas y en la gestión de los sistemas de energía renovable, contribuye a la generación de empleo e ingreso, mejorando las condiciones de vida de los habitantes de forma integral; el beneficio también se ve reflejado en la extensión de horario para sus labores cotidianas y la ampliación en las franjas de estudio, mejorando la alfabetización. Con respecto a la dimensión ambiental, la producción y utilización de energía renovable, es parte de la infraestructura ecológica que contribuye al objetivo de hacer sostenible la actividad del turismo comunitario. En cuanto al ámbito institucional, los desafíos y riesgos que plantean la puesta en marcha de estas actividades, deben ser asumidos de forma concertada con todas las partes interesadas, en el marco de una política pública inclusiva que aborde todas las dimensiones de la sustentabilidad del desarrollo.

5. AGRADECIMIENTOS

A los jóvenes investigadores Juan Luis Buelvas, Diana Arellano, Liz Zuluaga y Yesica Ardila del semillero de investigación en Desarrollo Humano Sostenible.

REFERENCIAS

- Asociacion de Productores de Energía Renovable. (2012). *Estudio del Impacto Macroeconómico de las Energías Renovables en España*. Recuperado el 10 de julio de 2014, de http://www.appa.es/descargas/Informe_2012_Web.pdf
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2010). *Energía Renovable en América Latina: Visión y Acción del BID*. Asunción: IDB.
- Banco Mundial. (3 de Abril de 2014). *Banco Mundial*. Recuperado el 22 de agosto de 2014, de <http://www.bancomundial.org/es/results/2013/04/10/sustainable-energy-for-all-results-profile>
- Benavides, J. (2009). *Proyectos Pilotos Con Fuentes Alternas implementados por el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas-IPSE y el Ministerio de Minas y Energía*.
- Best, G., Van Campen, B., & Guidi, D. (2000). *Energía solar fotovoltaica para la agricultura y desarrollo rural sostenibles*. Roma.
- Breceda, M., Rincon , E., & Santander, L. C. (2007). *Uso de energía alternativa en los desarrollos turísticos del Caribe*. Ciudad de Mexico .
- Burguillo, M., & del Río, P. (2008). La contribución de las energías renovables al desarrollo rural sustentable en la Unión Europea: pautas teóricas para el análisis empírico. *Tribuna de Economía*, 149 - 165.
- Cadena, Á. I., Botero, S., Táutiva, C., Betancur, L., & Vesga, D. (2008). *Regulación para incentivar las energías alternas y la generación distribuida en Colombia*. Bogotá.
- Caiza, J. (2012). *Energía Social para la Prosperidad Electrificación Escuelas Rurales*.
- Cardín, M. (2010). *Indicadores de sostenibilidad para el Desarrollo Rural. Actitudes y Perspectivas de los agricultores*.
- Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas – CIEMAT. (Octubre de 2008). *Portal de energías renovables*. Recuperado el 20 de enero de 2014, de http://www.energiasrenovables.ciemat.es/suplementos/sit_actual_renovables/solar.htm
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe - CEPAL. (2011). *Hacia una nueva definición de lo “rural” con fines estadísticos en América Latina*. Santiago de Chile.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2013a). *Energía y desarrollo sustentable en América Latina y el Caribe*. Santiago de Chile. Obtenido de <http://www.cepal.org/publicaciones/xml/8/15138/lcg2214e.pdf>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2013). *Perspectivas de la agricultura y del desarrollo rural en las Américas, una mirada hacia América Latina y el Caribe*. Santiago de Chile.

- Obtenido de <http://www.fao.org/3/a-as167s.pdf>
- Comisión Mundial del Medio Ambiente y Desarrollo - CMMAD. (3 de 1987). *Documentación de las Naciones Unidas. Guía de Investigación*. Recuperado el 13 de febrero de 2014, de <http://www.un.org/depts/dhl/spanish/resguids/specenvsp.htm>
- Cox, J. R. (2009). *Turismo indígena y comunitario en Bolivia: Un instrumento para el desarrollo socio-económico e intercultural*. Bolivia: Plural editores.
- Del Barco, L. (2010). *Turismo comunitario en países de desarrollo: Buenas prácticas para la planificación de un emprendimiento*.
- Ecología y Desarrollo. (febrero de 2008). *ecodes.org*. Obtenido de <http://www.ecodes.org/documentos/cooperacion/PM-febrero-2008.pdf>
- El tiempo. (2013 de agosto de 2013). *Instalan techo con agua que opera con energía solar en el Panachi*. Recuperado el 30 de agosto de 2014, de <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-12971405>
- Escribano, G., & Malamud, C. (17 de 3 de 2014). *Real Instituto Elcano*. Recuperado el 21 de julio de 2014, de http://www.realinstitutoelcano.org/wps/portal/rielcano/contenido?WCM_GLOBAL_CONTEXT=/elcano/elcano_es/programas/energiacambioclimatico/publicaciones/ari16-2014-escribano-malamud-energia-america-latina-recursos-politicas-parte1
- Ferrel, M. E. (2007). *Energía solar y turismo rural*. La Paz: Falk Solar- Aplicaciones de energía solar.
- Gascón, J., & Cañada, E. (2005). *Viajar a todo tren: Turismo, desarrollo y sostenibilidad*. Barcelona: Icaria .
- Gutiérrez, I. (2007). *Ecoturismo con energías renovables*. Cochabamba. Obtenido de www.energética.info
- Heinemann, E. (2014). *ENERGAL – Energías renovables para Galápagos*. Ecuador: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.
- Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas. (26 de agosto de 2014). *Implementación del Sistema Solar Fotovoltaico en la Comunidad Indígena de Bari - Tibú (Norte de Santander)*. Recuperado el 1 de septiembre de 2014, de <http://www.ipse.gov.co/ipse/comunicaciones-ipse/noticias-ipse/922-implementacion-del-sistema-solar-fotovoltaico-en-la-comunidad-indigena-de-bari-tibu-norte-de-santander>
- Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas. (04 de Noviembre de 2013). *IPSE*. Recuperado el 23 de julio de 2014, de <http://www.ipse.gov.co/ipse/comunicaciones-ipse/noticias-ipse/628-isla-fuerte-bolívar-recibió-a-conferencistas-del-ix-simposio-internacional-de-energía>
- Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas. (27 de FEBRERO de 2014). *Energía limpia para el ecoturismo en el Parque Nacional Natural Utría en el Chocó*. Recuperado el 30 de Agosto de 2014, de <http://www.ipse.gov.co/ipse/comunicaciones-ipse/noticias-ipse/885-energia-limpia-para-el-ecoturismo-en-el-parque-nacional-natural-utria>
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía - Deloitte. (Madrid de 2011). *Impacto económico de las energías renovables en el sistema productivo español. Estudio Técnico PER 2011-2020*. Recuperado el 14 de julio de 2014, de http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e3_impacto_economico_4666bcd2.pdf
- International Energy Agency. (2013). *World Energy Outlook*. Recuperado el 15 de mayo de 2014, de http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2013_Executive_Summary_English.pdf
- Kay, C. (2009). *Estudios rurales en América Latina en el periodo de globalización neoliberal: ¿una nueva ruralidad?* México D.F.
- Leal, M. (2008). *Propuesta de Turismo Rural para la Región Andina*. IICA. Obtenido de <http://www.iica.int/Esp/organizacion/LTGC/agroturismo/Proyectos%20Andina/Resumen%20Propuesta%20Turismo%20Rural%20Andino.pdf>
- Lucarelli, M. V. (2010). *Eficiencia energética y energías renovables en los hoteles de Uruguay*. España: Universidad de Alicante, Instituto Universitario de Investigaciones Turísticas .
- Naciones Unidas. (2013). *Políticas y experiencias territoriales relevantes para el empoderamiento de las mujeres rurales en Colombia*. Obtenido de <http://issuu.com/cinepppp/docs/colombia-enfoque-territorial-empoderamiento-mujeres>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2012). *Experiencias y enfoques de procesos participativos de innovación en agricultura. El caso de la corporación PBA en Colombia*. Obtenido de <http://www.fao.org/docrep/017/i3136s/i3136s.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la agricultura. (2013). *Pobreza rural y políticas públicas en América Latina y el Caribe*. Santiago de Chile.
- Organización Latinoamericana de Energía - Naciones Unidas. (2003). *Energía y desarrollo sustentable en América Latina y el Caribe*. Santiago de Chile.
- Pacheco, V., Carrera, P., & Almeida Ferri, K. (2011). Propuesta metodológica para la evaluación de la factibilidad de proyectos de turismo comunitario. Caso de estudio: Comunidades Huaorani, Achuar y Shiwiar de la Amazonía Ecuatoriana. *Gestión Turística N° 15(15), 21 - 46*. Recuperado el 28 de julio de 2014, de http://mingaonline.uach.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-64282011000100002&lng=es&nrm=iso
- Paniagua, Á., & Moyano, E. (1996). Medio ambiente, desarrollo sostenible y escalas de sustentabilidad. *Reis*, 151 - 175. Recuperado el 6 de agosto de 2013, de <file:///C:/Users/Tania/Downloads/Dialnet-MedioAmbienteDesarrolloSostenibleYEscalasDeSustent-757748.pdf>
- Planeta Paz. (2012). *La cuestión agraria en Colombia: tierra, desarrollo, y paz*. Bogotá D.C.
- Proexport Colombia. (s.f.). *Colombia Travel. Casa navegante Cholón / Barú - Colombia*. Recuperado el 30 de agosto de

- 2014, de <http://www.colombia.travel/es/turista-internacional/actividad/hoteles-con-estilo/cartagena>
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo - PNUD. (2011). *Informe Nacional de Desarrollo Humano. Colombia Rural. Razones para la esperanza*. Bogotá: PNUD.
- Rendón, J. (enero - junio de 2007). El desarrollo humano sostenible ¿Un concepto para las transformaciones? *Equidad & Desarrollo*(007), 111 - 129.
- Rodriguez, J. (21 de 06 de 2011). *Escapada Rural. Energías renovables para alojamientos rurales*. Recuperado el 21 de enero de 2014, de <http://www.escapadarural.com/blog/propietarios/energias-renovables-para-alojamientos-rurales/>
- Rojas, H. (2005a). ¿El Turismo Rural alternativa de Desarrollo? *¿El Turismo Rural alternativa de Desarrollo? ; Reflexiones alrededor de observaciones en el Municipio de San Gil en el departamento de Santander, Colombia.*, (págs. 1 - 18). Bogotá. Obtenido de http://www.javeriana.edu.co/ear/m_des_rur/documents/RojasP2005ponencia-Colombia.pdf
- Rojas, H. (agosto de 2005b). ¿El Turismo Rural alternativa de Desarrollo? Recuperado el 2 de mayo de 2014, de http://www.javeriana.edu.co/ear/m_des_rur/documents/RojasP2005presentacion.pdf
- Romero, A. (2006). *Las Energías Renovables en el Turismo Comunitario*. Obtenido de <http://www.conae.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/4082/1/arturoromero.pdf>
- Schlüter, R. G. (1996). *Energia renovable y turismo en la patagonia Argentina*. Buenos Aires.
- Sen, A. (2000). *Desarrollo y Libertad*. Madrid: Planeta.
- Tetreault, D. (julio - diciembre de 2008). Escuelas de pensamiento ecológico en las Ciencias Sociales. *Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo. Estudios Sociales.*, 16(32), 228 - 263. Obtenido de <http://www.redalyc.org/pdf/417/41703208.pdf>
- Unión Europea. (2011). *Energía renovable para un desarrollo sostenible*. Recuperado el 22 de enero de 2014, de http://ec.europa.eu/europeaid/where/latin-america/regional-cooperation/euro-solar/documents/bdfs_cancun_euro-solar_es.pdf
- Universidad San Francisco. (2010). Turismo Sostenible un nuevo motor de desarrollo para ecuador. *ENFOQUE*, 3. Obtenido de http://www.usfq.edu.ec/publicaciones/enfoque/Documents/enfoque_016.pdf