

MOMENTO 55
Julio-diciembre 2017

$k_{Q_{clin}}^{f_{clin}} / k_{Q_{msr}}^{f_{msr}}$ correction factors of plastic scintillators and other
stereotactic detectors for sub-centimeter photonfields
using Monte Carlo

*Factores de corrección $k_{Q_{clin}}^{f_{clin}} / k_{Q_{msr}}^{f_{msr}}$ de centelladores plásticos y otros
detectores estereotáticos para campos sub-centimétricos
de fotones usando Monte Carlo*

Norman H. Machado, Johans Restrepo..... 1

Dependence of photonic band gap on the Radius of traces
in TiO_2 nanostructures

*Dependencia del gap fotónico con el radio de las huellas
en nanoestructuras de TiO_2*

Claudia P. Barrera, Heiddy P. Quiroz, Rafael R. Rey,
Anderson Dussan 26

Estudio teórico del ferromagnetismo de la superficie
m-GaN dopada con Mn

*Theoretical study of surface ferromagnetism
m-GaN doped WITH Mn*

Oscar Martínez, William López, Alvaro González, Rafael González 36

Las celdas solares como alternativa pedagógica
en la enseñanza de la electricidad

*Solar cells as a pedagogical alternative in the
teaching of electricity*

Clara L. Calderón, John Aguirre..... 44

Diseño, construcción e implementación de sistema
de adquisición y análisis de datos para la enseñanza
del movimiento rectilíneo en el laboratorio

*Design, construction and implementation of acquisition
system and analysis of data for the teaching of the
unidimensional movement in the laboratory*

Yeimmy Londoño, Jimmy A. Cortes, María E. Fernández..... 57

Publicación admitida en:

SciELO Colombia

Fuente Académica
Premier (EBSCO)

Índice Nacional de
Publicaciones Seriadas,
Científicas y Tecnológicas
de Colciencias PUBLINDEX

Latindex Sistema Regional
de Información en línea
para revistas Científicas de
América Latina, Caribe,
España y Portugal.

Julio-diciembre 2017

MOMENTO - Revista de Física

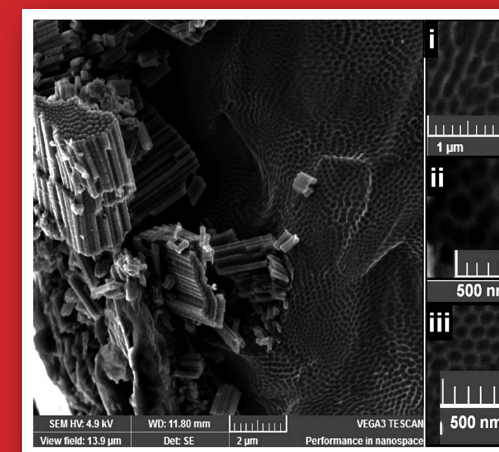
Número 55

ISSN 0121-4470

MOMENTO

Revista de Física

No. **55**
JUL-DIC
2017



SEM micrograph of TiO_2 traces and the nanotubes



Facultad de Ciencias
Sede Bogotá



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

MOMENTO

Revista de Física

Departamento de Física
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá, Colombia

La revista MOMENTO publica semestralmente resultados originales inéditos de investigación básica y aplicada en diversas áreas de la física, así como artículos de reflexión, revisión y cortos acerca del estado actual de los problemas más activos de la física, tales como:

- Ciencia e Ingeniería de Materiales.
- Física del Estado Sólido.
- Física de altas energías.
- Óptica.
- Física Médica y Biofísica.
- Geofísica.
- Física Nuclear.
- Fisicoquímica.
- Caos y complejidad.
- Epistemología y Filosofía de la Física.
- Nanociencias y Nanotecnología

MOMENTO se puede recibir:

- A través de canje con publicaciones similares.

Más información en <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/momento>



MOMENTO Revista de Física de la Universidad Nacional de Colombia se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución - Sin derivar 4.0 Internacional. Ésta licencia permite la redistribución, comercial o no comercial, siempre y cuando la obra circule íntegra y sin cambios, donde indique su autor y su primera publicación en esta revista..

ISSN 0121-4470

momento

Revista de Física

No.

55

JUL-DIC
2017

Editor

Alvaro Mariño, Dr. rer. nat. *Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.*

Comité Editorial

Noboru Takeuchi, Ph.D. *Departamento de Nanoestructuras, Centro de Nanociencias y Nanotecnología, Universidad Nacional Autónoma de México. Ensenada, México.*

Andrés Rosales, Dr. Sc. *Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia. Manizales, Colombia.*

Eval Baca Miranda, Dr. Sc. *Departamento de Física, Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad del Valle, Colombia.*

Diego Restrepo Quintero, Dr. Sc. *Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Antioquia, Colombia.*

Comité Científico

Ángela Camacho, Dr. rer. nat. *Departamento de Física, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.*

Hernán Sánchez, Dr. rer. nat. *Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.*

Diógenes Campos, Dr. rer. nat. *Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Bogotá, Colombia.*

Fernando Cristancho, Dr. rer. nat. *Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.*

Germán Pérez, Dr. Sc. *Departamento de Física, Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad del Valle, Cali, Colombia.*

María Teresa Malachevsky, Dr. Sc. *Centro atómico Bariloche. Instituto Balseiro. CNEA. Argentina.*

Pablo Hernández, Dr. Sc. *Departamento Electricidad y Electrónica, Universidad de Valladolid, España.*

Manuel Vázquez, Dr. Sc. *Departamento de Física da Materia Condensada, Universidade de Santiago de Compostela, España*

Eduardo Padrón, Dr. Sc. *Departamento de Física, Universidad Federal de Pernambuco, Brasil.*

Facultad de Ciencias
Sede Bogotá



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Esta edición contó con el apoyo de:

- Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.
- Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.

ISSN 0121-4470 (Impreso)

ISSN 2500-8013 (En línea)

doi:10.15446/mo

Edición:

- Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, Colombia.

Cubierta: Imagen seleccionada del artículo “Dependence of photonic band gap on the radius of traces in TiO_2 nanostructures” (pág26).

Diagramación en L^AT_EX:

Mónica López

Asistente editorial

© MOMENTO Revista de Física. Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia

Página web: <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/momento>

Correo electrónico: momento_fcbog@unal.edu.co

Dirección Postal: Carrera 30 No 45 03, Edif. 404 (Departamento de Física), Bogotá, Colombia.

Teléfono: (57 1) 3165000 ext.13009

Preprensa y prensa:

Proceditor ltda.

Calle 1C No.27 A - 01

Teléfonos: 757 92 00 - 313 251 54 98

Bogotá, D.C., Colombia

proceditor@yahoo.es

CONTENIDO

MOMENTO 55 - Julio-Diciembre, 2017

$k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$ correction factors of plastic scintillators and other stereotactic detectors for sub-centimeter photonfields using Monte Carlo <i>Factores de corrección $k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$ de centelladores plásticos y otros detectores estereotáticos para campos sub-centimétricos de fotones usando Monte Carlo</i>	
Norman H. Machado, Johans Restrepo.....	1
 Dependence of photonic band gap on the Radius of traces in TiO2 nanostructures <i>Dependencia del gap fotónico con el radio de las huellas en nanoestructuras de TiO2</i>	
Claudia P. Barrera, Heiddy P. Quiroz, Rafael R. Rey, Anderson Dussan.....	26
 Estudio teórico del ferromagnetismo de la superficie m-GaN dopada con Mn <i>Theoretical study of surface ferromagnetism m-GaN doped WITH Mn</i>	
Oscar Martínez, William López, Alvaro González, Rafael González.....	36
 Las celdas solares como alternativa pedagógica en la enseñanza de la electricidad <i>Solar cells as a pedagogical alternative in the teaching of electricity</i>	
Clara L. Calderón, John Aguirre.....	44
 Diseño, construcción e implementación de sistema de adquisición y análisis de datos para la enseñanza del movimiento rectilíneo en el laboratorio <i>Design, construction and implementation of acquisition system and analysis of data for the teaching of the unidimensional movement in the laboratory</i>	
Yeimmy Londoño, Jimmy A. Cortes, María E. Fernández.....	57

$k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$ CORRECTION FACTORS OF PLASTIC
SCINTILLATORS AND OTHER STEREOTACTIC
DETECTORS FOR SUB-CENTIMETER PHOTON
FIELDS USING MONTE CARLO

FACTORES DE CORRECCIÓN $k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$ DE
CENTELLADORES PLÁSTICOS Y OTROS
DETECTORES ESTEREOTÁTICOS PARA CAMPOS
SUB-CENTIMÉTRICOS DE FOTONES USANDO
MONTE CARLO

Norman H. Machado¹, Johans Restrepo²

¹ Division of Medical Physics, Hospital Universitario de San Vicente Fundación Physics
Institute, Universidad de Antioquia, Medellín 050010, Colombia.

² Group of Magnetism and Simulation, Physics Institute, Universidad de Antioquia,
Medellín 050010, Colombia

(Received: February/2017. Accepted: June/2017)

Abstract

The goals of this work are: (1) To evaluate a plastic scintillation detector and other stereotactic dosimeters for measuring output factors, dose profiles and percent depth dose curves of small and sub-centimeter radiation fields and (2) to obtain tables of $k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$ correction factors based on Monte Carlo simulations using codes BEAMnrc and DOSXYZnrc.

Tables of output ratios and dose profiles for radiation fields conformed by a micro-multileaf collimator were obtained for the stereotactic detectors: 1) Standard Imaging W1 Exradin Plastic Scintillation Detector with 1 mm diameter and 3 mm length, 2) PTW dosimetry diode E type 60017 with 1.13 mm diameter and 30 μm thickness and 3) PTW Pinpoint 31016 3D ionization chamber with 3.13 mm diameter.

Monte Carlo BEAMnrc simulations were performed for the 6 MeV energy of a Varian Clinac iX linear accelerator with the micro-multileaf collimator attached to its gantry. The

DOSXYZnrc Monte Carlo code was used to calculate the output factors $\Omega_{Q_{clin}, Q_{msr}, water}^{f_{clin}, f_{msr} MC}$ and the dose profiles in a virtual water phantom by means of the phase space file obtained from the BEAMnrc simulation. The $k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$ factor tables presented in this work show that for field sizes with radius larger than the range of secondary charged particles, the corrections for the set of detectors are lower than 7 % compared with Monte Carlo calculations. However, for sub-centimeter radiation fields, the corrections are about of 23 % for the PTW Pinpoint ionization chamber and up to 12 % for the rest of detectors.

Keywords: Small field dosimetry, Monte Carlo BEAMnrc & DOSXYZnrc, field output factors, plastic scintillation detectors, stereotactic detectors.

Resumen

Los objetivos de este trabajo son (1) Evaluar un detector de centelleo plástico y otros dosímetros estereotáticos para medir factores de output, perfiles de dosis y curvas de dosis en profundidad de campos de radiación pequeños y subcentimétricos y (2) Obtener tablas de factores de corrección $k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$, tomando como base simulaciones Monte Carlo usando los códigos BEAMnrc y DOSXYZnrc. Se obtuvieron tablas de razones de output y perfiles de dosis para campos de radiación conformados por un colimador micro-multiláminas por medio de los detectores estereotáticos: 1) Detector de centelleo plástico marca Standard Imaging Exradin W1 con 1 mm de diámetro y 3 mm de longitud, 2) Diodo dosimétrico de electrones marca PTW tipo 60017E con 1.13 mm de diámetro y 30 micrómetros de espesor, 3) Microcámara de ionización 3D marca PTW tipo pinpoint 31016 con 3.13 mm de diámetro. Se realizaron simulaciones mediante el código de Monte Carlo BEAMnrc del acelerador lineal de marca Varian Clinac iX para su energía en fotones de 6 MeV con un colimador adicional micromultiláminas acoplado al gantry. El código de Monte Carlo DOSXYZnrc se usó para calcular los valores de output factor denotados como $\Omega_{Q_{clin}, Q_{msr}, water}^{f_{clin}, f_{msr} MC}$ y los perfiles de dosis en un fantoma

virtual de agua y por medio del archivo de espacio de fase obtenido de la simulación BEAMnrc.

Las tablas de los factores $k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$ presentadas en este trabajo muestran que para tamaños de campo de radiación con radios mayores que el rango de las partículas cargadas secundarias, las correcciones para el conjunto de detectores son menores al 7% comparados con los cálculos de Monte Carlo. Sin embargo, para campos de radiación sub-centimétricos, las correcciones son de alrededor del 23% para la cámara de ionización Pinpoint PTW 31016 y hasta del 12% para el resto de los detectores.

Palabras clave: Dosimetria de campo bajo, Monte Carlo BEAMnrc & DOSXYZnrc, Factores de salida de campo, Detectores plásticos de centelleo, Detectores Estereotacticos

Introduction

Small photon fields have been increasingly used in the last few years due to the introduction of new treatment techniques.[1] Stereotactic radiosurgery has used small photon fields since many years ago, in malignant tumors and benign pathologies. High radiation doses have been prescribed for small planning target volumes but the dosimetry of sub-centimeter radiation fields is still a subject of controversy and alerts.

Many stereotactic detectors have been designed and tested for dosimetry of small photon fields such as air-filled or liquid-filled ionization microchambers [2–4], shielded or unshielded silicon diodes,[5, 6] plastic scintillation detectors (PSD),[7, 8] radiochromic films,[9, 10] micro MOSFET detectors,[11] thermoluminescent dosimeters (TLD),[12] optically stimulated luminescent dosimeters (OSL),[13, 14] micro- diamonds,[5] Alanine gel and Fricke gel dosimeters.[15] However, there are significant differences among these dosimeters when output factors of small radiation fields are measured.

Multiple variables affect the accuracy of small photon field dosimetry. Including the density and atomic composition of the detector,[16, 17] the source occlusion effect and its volume

averaging errors,[18] the peak-shaped dose profiles, the volume of the detector itself, the changes of the energy spectrum caused by beam hardening and the lack of lateral equilibrium of secondary charged particles.[19]

On this regard, this work calculates the $k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$ correction factors for different stereotactic detectors, considering the use of the linac jaws and the micro-multileaf collimator to conform the small photon fields.

Materials and Methods

A Varian Clinac iX linear accelerator with the BrainLab m3 micro-multileaf collimator attached to its gantry was simulated for the energy of 6 MeV photons with a $TPR_{20/10}$ of 0.666 (Figure 1).

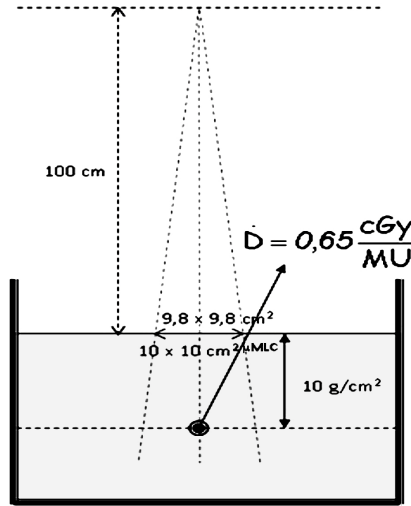


FIGURE 1. Sketch for the simulation and data acquisition setup.

The experimental and Monte Carlo setup consisted on positioning each detector at 10 cm depth in a water phantom or its equivalent. The source surface distance was set at 100 cm where the sizes of the set of radiation fields were defined. The absolute dose rate for the calibration radiation field of 10 cm X 10 cm jaws and 9.8 cm X

9.8 cm micro multileaf collimator was measured by a semiflex PTW 31010 ionization chamber and found to be 0.65 cGy/MU.

The W1 Exradin Plastic Scintillation Detector:

The Exradin W1 Plastic Scintillation Detector manufactured by Standard Imaging was used in the present study. The W1 is the first commercially available radiation detector using organic scintillators. It comprises a small cylinder of 1 mm diameter and 3 mm length corresponding to a circular cross section of 0.79 mm². The scintillator is composed by a core of scintillating fiber of polystyrene surrounded by an acrylic cladding. The effective atomic number (Z_{eff}) of the plastic scintillating detector is reported as 5.7.[20]

This piece of scintillator material is optically coupled to another acrylic optical fiber of 1 mm diameter and 3 m length. When the scintillating fiber is irradiated by a high-energy beam, a scintillation signal is produced. Electrons set in motion by primary photons gain high enough energies to travel through the optical fiber at relativistic velocities, so generating a Cherenkov radiation spectrum in the optical fiber.[21]

The signals produced are guided to a photodiode enclosure that generates two charge signals which can be measured by a dual channel electrometer specially designed to work efficiently with the system.

The spectral discrimination was chosen as the method for dose calibration purposes.[22] Such a method is supported on the fact that the Cherenkov spectrum must be invariant under irradiation configuration.[21]

The dose at a pre-defined condition n was measured by means of a PTW semiflex 31010 ionization chamber with absolute calibration and expressed by a linear combination of the readings in the two channels (CH_i) of the electrometer in the following way:

$$D_n = \alpha(CH_1) + \beta(CH_2) \quad (1)$$

where α and β are calibration constants which can be found by irradiating the plastic scintillator under two different conditions

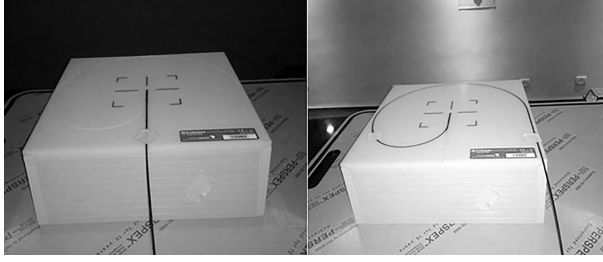


FIGURE 2. Pictures of the two different configurations of irradiated optical fiber used in this work.

of Cherenkov-light ratio. The virtual water slab that is shown in Figure 2 allows to irradiate a minimum and maximum amount of optical fiber so that the next matrix equation can be solved:

$$\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} CH_{1,min,10 \times 10} & CH_{2,min,10 \times 10} \\ CH_{1,max,30 \times 30} & CH_{2,max,30 \times 30} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

where $CH_{1,min,10 \times 10}$ corresponds to the reading of the first channel of the electrometer for a $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ radiation field with the minimum amount of optical fiber exposed to radiation and so forth for the other variables.

Once the calibration coefficients were found, the dose for any field size was obtained with the Plastic Scintillation Detector using the equation:

$$D_{PSD} = \alpha(CH_1) + \beta(CH_2) \quad (3)$$

To avoid Cherenkov spectrum variations, all the measurements were done following the same calibration setup namely at 10 cm depth and at a source to surface distance of 100 cm.

The orientation of the plastic scintillator was chosen perpendicular to the beam central axis both in solid and liquid water. The effective point of measurement in liquid water was set by means of a plastic cap supplied by the manufacturer. The positioning in solid water was done using the carved plastic slab. When the scintillator is oriented parallel to the beam central axis, the volume averaging effect reduces significantly in comparison to the perpendicular orientation. However, since the calibration of the Exradin W1 was done for the perpendicular positioning by means

of the solid water slab, we consider to keep as invariant as possible the Cerenkov effect generated in the optical fiber in comparison to the calibration condition.

The electrometer used was the Standard Imaging dual channel SuperMax especially designed to improve the signal to noise ratio.

Dosimetry Diode E PTW 60017:

The p-type unshielded silicon diode is a well-recognized stereotactic dosimeter. Its small circular area of 1 mm^2 gives it a high spatial resolution that reduces the averaging effect making it ideal for the measurement of output factors for very small fields. However, silicon is not water-equivalent. Its atomic number ($Z=14$) is higher than the effective atomic number of water.

In this study, the diode was coupled to a MP3 PTW motorized water phantom and the output ratios, depth dose curves and profiles were measured with the stem of the detector parallel to the central beam axis. The reference point was set at 0.8 mm taken from the detector tip, corresponding to 1.3 mm water equivalent.

Pinpoint 3D Ionization Chamber PTW 31016:

The PTW 31016 is an air-filled ionization chamber with a measuring volume of 16 mm^3 . Its wall is made of 0.57 mm of PMMA (1.19 g/cm^3) and 0.09 mm of graphite (1.84 g/cm^3). The output ratios, percent depth dose curves and dose profiles were obtained with the chamber set at 10 cm depth in water with 100 cm source to surface distance. The stem of the chamber was aligned perpendicular to the beam central axis. The reference point was set at 2.4 mm taken from the ion chamber tip at the geometrical center of the cross section. The effective atomic number (Z_{eff}) of the air inside the sensitive volume is 7.8 as calculated with equation 7.26 in [23].

Monte Carlo Simulations:

The BEAMnrc[24] and DOSXYZnrc[25] codes of the EGSnrc Monte Carlo system[26] were used to simulate the linear accelerator Varian Clinac iX with the m3 mMLC attached to the linac gantry.

The BEAMnrc code does not have a specific module for the Monte Carlo simulation of the BrainLab m3 mMLC but some previously published works[27] have proven good results with the use of the VARMLC module from the standard distribution of the BEAMnrc code. The actual three-faceted shape of the leaf is approximated to a circular edge and the three tongues and grooves of the original micro leaf is replaced by only one pair to fit the VARMLC module parameters. This was the method followed in the present study.

The simulation was made in two steps. First, by means of the BEAMnrc code, the linac gantry was simulated by considering the following elements: target, primary collimator, flattening filter, linac ionization chamber, mirror, secondary Y and X collimators, 120 MLC, m3 micro- multileaf collimator and air to an extent of 100 cm. Second, phase space files corresponding to many combinations of jaws and micro leaves were obtained and the DOSXYZnrc code was used as a voxelized water phantom for each phase space file. The volume of the voxels was 1 mm^3 at the beam central axis up to the depth of 5 cm and 2 mm^3 beyond. The materials and dimensions of the linac parts were taken from the Monte Carlo simulation package supplied by Varian[®] under a policy of confidentiality.

Following the method of Cranmer-Sargison,[28] where different configurations of incident electron beam energy and focal spot sizes were studied, an energy of 6.2 MeV for the incident beam energy and 0.11 cm for circularly symmetric Gaussian FWHM were chosen in this work to model the electron beam source at the target. With these values, the simulated percent depth dose curves and profiles matched the measured data for the linac calibration radiation field, endorsing the selection of parameters.

The Directional Bremsstrahlung Splitting technique (DBS),[29] was used to reduce the variance and improve both the photons and electrons fluence.

The number of histories simulated for the first step was 108 to obtain an average uncertainty on the dose calculation of less than 0.7%.

The equation used for the calculation of the Monte Carlo output factors[30] is given by:

$$\Omega_{Q_{clin}, Q_{msr}, waterMC}^{f_{clin}, f_{msr}} = \left(\frac{D_{waterMC}^{f_{clin}}}{D_{waterMC}^{f_{msr}}} \right) \left(\frac{D_{monitorMC}^{f_{msr}}}{D_{monitorMC}^{f_{clin}}} \right) \quad (4)$$

where $D_{waterMC}^{f_{clin}}$ is the dose calculated by the DOSXYZ Monte Carlo code for the different clinical field sizes simulated and presented in this work, $D_{waterMC}^{f_{msr}}$ is the dose calculated by the same Monte Carlo code for the machine specific reference field set in this work by 9.8 cm $\times$ 9.8 cm jaws and 10 cm $\times$ 10 cm micro MLC. $D_{monitorMC}^{f_{clin}}$ is the Monte Carlo dose accumulated in the linac ion chamber at the time the clinical fields are virtually irradiated. $D_{monitorMC}^{f_{msr}}$ is also the Monte Carlo dose accumulated in the linac ion chamber for the machine specific reference field.

Detector Specific Output Ratio Measurements:

The direct ratio of the readings for the clinical field and the machine specific reference obtained by the different detectors with the measurement setup is presented in tables II to VI. This magnitude is called the output ratio and it is expressed by the equation:

$$OR_{det}^{f_{clin}} = \frac{M_{Q_{clin}}^{f_{clin}}}{M_{Q_{msr}}^{f_{msr}}} \quad (5)$$

where $M_{Q_{clin}}^{f_{clin}}$ is the direct reading of each detector for the different clinical field sizes and $M_{Q_{msr}}^{f_{msr}}$ is the direct reading for the machine specific reference field.

Calculation of the $k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$ Correction Factors:

From the formalism for reference dosimetry of small and non-standard fields proposed by the International Atomic Energy Agency,[31] it is stated that the absorbed dose to water $D_{w, Q_{clin}}^{f_{clin}}$ at a reference point in a phantom for a clinical field f_{clin} of quality Q_{clin} in the absence of the chamber is given by:

$$D_{w, Q_{clin}}^{f_{clin}} = D_{w, Q_{msr}}^{f_{msr}} \Omega_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}} \quad (6)$$

where $\Omega_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$ is the field output factor that converts the absorbed dose to water $D_{w, Q_{msr}}^{f_{msr}}$ for a machine specific reference field f_{msr} to the absorbed dose to water for the clinical field f_{clin} . The product of the output ratio $OR_{det}^{f_{clin}}$ and the correction factor $k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$ gives the field output factor:

$$\Omega_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}} = OR_{det}^{f_{clin}} k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}} \quad (7)$$

from which $k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$ correction factors were obtained in this work for different radiation fields and detectors, using the Monte Carlo calculated field output factors $\Omega_{Q_{clin}, Q_{msr}, waterMC}^{f_{clin}, f_{msr}}$ and the measured values of $OR_{det}^{f_{clin}}$.

Profiles and Percentage Depth Dose Curves:

For obtaining dose profiles, the W1 Exradin PSD was coupled to a PTW MP3 water tank by means of a homemade holder. The graphical interphase of the PTW Mephysto mc² software showed Cerenkov and scintillation signals with a wedge-shaped profile for each channel but once the signals were composed point by point by means of equation (3), became the final dose profiles.

The micro ionization chamber and the Dosimetry Diode were also coupled to the PTW MP3 water tank. The chamber was set with its axis perpendicular to the beam central axis and the diode was set parallel to it.

Regarding the the Monte Carlo simulations, a program called STATDOSE for analyzing 3-dimensional dose distributions generated by DOSXYZnrc was used to obtain curves of the percentage depth dose distributions and dose profiles.

Results

Theoretical calculations of the field output factors found with the BEAMnrc and DOSXYZnrc Monte Carlo codes are shown in Table 1. The output ratios table for the different combinations of jaws and mMLC openings measured by the set of stereotactic detectors used in this work are presented in Tables 2, 3, 4 and 5. Calculations of the $k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$ correction factor by means of the Equation (7)

		Jaw Field Size [mm ²]						
		8x8	14x14	20x20	44x44	60x60	80x80	98x98
mMLC Field Size [mm ²]	6x6	0.609	0.619	0.624	0.612	0.628	0.622	0.624
	12x12	0.669	0.740	0.756	0.777	0.770	0.770	0.774
	18x18	0.654	0.775	0.800	0.816	0.832	0.825	0.794
	24x24	0.653	0.771	0.811	0.843	0.862	0.869	0.888
	30x30	0.664	0.755	0.817	0.868	0.877	0.892	0.888
	36x36	0.652	0.763	0.804	0.873	0.879	0.912	0.931
	42x42	0.663	0.767	0.807	0.897	0.914	0.926	0.921
	60x60	0.660	0.767	0.803	0.900	0.944	0.960	0.973
	80x80	0.651	0.762	0.796	0.906	0.936	0.948	0.984
	100x100	0.656	0.772	0.799	0.895	0.940	0.993	1.000

TABLE 1. Field Output Factors $\Omega_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$ obtained by the BEAMnrc and DOSXYZnrc codes.

		Jaw Field Size [mm ²]						
		8x8	14x14	20x20	44x44	60x60	80x80	98x98
mMLC Field Size [mm ²]	6x6	0.562	0.615	0.617	0.626	0.621	0.628	0.628
	12x12	0.596	0.740	0.752	0.766	0.768	0.770	0.771
	18x18	0.596	0.752	0.791	0.815	0.823	0.827	0.828
	24x24	0.596	0.752	0.797	0.839	0.851	0.858	0.862
	30x30	0.595	0.753	0.798	0.856	0.870	0.880	0.885
	36x36	0.600	0.752	0.797	0.870	0.885	0.898	0.904
	42x42	0.598	0.752	0.798	0.881	0.898	0.912	0.920
	60x60	0.597	0.752	0.798	0.885	0.929	0.946	0.956
	80x80	0.597	0.753	0.798	0.885	0.929	0.970	0.984
	100x100	0.597	0.753	0.798	0.886	0.930	0.971	1.000

TABLE 2. Output ratios obtained with the W1 Exradin PSD in solid water.

Jaw Field Size [mm ²]								
		8x8	14x14	20x20	44x44	60x60	80x80	98x98
mMLC Field Size [mm ²]	6x6	0.580	0.620	0.623	0.631	0.630	0.636	0.635
	12x12	0.612	0.740	0.751	0.763	0.766	0.768	0.767
	18x18	0.611	0.753	0.789	0.812	0.820	0.825	0.825
	24x24	0.612	0.753	0.795	0.836	0.847	0.856	0.857
	30x30	0.612	0.752	0.796	0.854	0.868	0.878	0.882
	36x36	0.612	0.752	0.796	0.868	0.883	0.894	0.902
	42x42	0.617	0.753	0.795	0.880	0.895	0.907	0.918
	60x60	0.620	0.753	0.796	0.884	0.925	0.944	0.954
	80x80	0.613	0.753	0.796	0.883	0.928	0.970	0.983
	100x100	0.614	0.752	0.796	0.884	0.927	0.969	1.000

TABLE 3. Output ratios obtained with the W1 Exradin PSD in liquid water.

Jaw Field Size [mm ²]								
		8x8	14x14	20x20	44x44	60x60	80x80	98x98
mMLC Field Size [mm ²]	6x6	0.623	0.653	0.656	0.660	0.662	0.664	0.665
	12x12	0.646	0.732	0.740	0.753	0.756	0.759	0.760
	18x18	0.646	0.740	0.769	0.792	0.799	0.804	0.807
	24x24	0.647	0.741	0.774	0.813	0.827	0.835	0.838
	30x30	0.646	0.741	0.775	0.831	0.845	0.857	0.862
	36x36	0.647	0.741	0.775	0.846	0.861	0.875	0.882
	42x42	0.647	0.740	0.775	0.859	0.876	0.890	0.899
	60x60	0.646	0.741	0.775	0.863	0.910	0.929	0.939
	80x80	0.647	0.741	0.775	0.863	0.912	0.961	0.976
	100x100	0.647	0.741	0.775	0.864	0.913	0.963	1.000

TABLE 4. Output ratios obtained with the Diode PTW 60017E.

		Jaw Field Size [mm ²]						
mMLC Field Size [mm ²]		8x8	14x14	20x20	44x44	60x60	80x80	98x98
	6x6	0.505	0.576	0.575	0.578	0.580	0.582	0.583
	12x12	0.543	0.723	0.733	0.745	0.747	0.750	0.751
	18x18	0.543	0.738	0.780	0.802	0.809	0.814	0.816
	24x24	0.544	0.738	0.786	0.828	0.840	0.848	0.852
	30x30	0.544	0.738	0.786	0.847	0.862	0.871	0.879
	36x36	0.542	0.736	0.785	0.862	0.876	0.889	0.897
	42x42	0.543	0.737	0.786	0.874	0.890	0.904	0.913
	60x60	0.543	0.738	0.785	0.878	0.921	0.940	0.950
	80x80	0.543	0.736	0.786	0.878	0.923	0.966	0.980
	100x100	0.543	0.738	0.785	0.878	0.923	0.967	1.000

TABLE 5. Output ratios obtained with the PTW Pinpoint 31016 Ionization Chamber.

		Jaw Field Size [mm ²]						
mMLC Field Size [mm ²]		8x8	14x14	20x20	44x44	60x60	80x80	98x98
	6x6	1.084	1.006	1.012	0.977	1.011	0.990	0.993
	12x12	1.123	1.000	1.006	1.014	1.002	1.000	1.004
	18x18	1.098	1.030	1.011	1.001	1.011	0.998	0.959
	24x24	1.095	1.026	1.017	1.005	1.013	1.013	1.030
	30x30	1.116	1.002	1.024	1.014	1.008	1.014	1.003
	36x36	1.087	1.015	1.009	1.004	0.993	1.015	1.030
	42x42	1.109	1.020	1.012	1.018	1.018	1.015	1.001
	60x60	1.105	1.020	1.006	1.017	1.016	1.015	1.018
	80x80	1.090	1.013	0.998	1.024	1.008	0.977	1.000
	100x100	1.099	1.025	1.002	1.010	1.011	1.023	1.000

TABLE 6. $k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$ factor for the W1 Exradin PSD detector in solid water.

for the set of different detectors used in this work are presented in Tables 6, 7, 8 and 9.

Figure 3 shows the Monte Carlo dose profiles calculated at 10 cm depth for the sub-centimeter radiation fields along the first row of the table.

Jaw Field Size [mm ²]								
		8x8	14x14	20x20	44x44	60x60	80x80	98x98
mMLC Field Size [mm ²]	6x6	1.049	0.998	1.001	0.970	0.996	0.977	0.983
	12x12	1.093	0.999	1.007	1.018	1.006	1.003	1.009
	18x18	1.070	1.029	1.014	1.004	1.015	1.000	0.962
	24x24	1.067	1.024	1.020	1.008	1.017	1.015	1.035
	30x30	1.084	1.004	1.026	1.016	1.011	1.016	1.006
	36x36	1.065	1.014	1.009	1.006	0.996	1.020	1.032
	42x42	1.075	1.018	1.014	1.020	1.021	1.020	1.003
	60x60	1.064	1.018	1.008	1.018	1.020	1.017	1.020
	80x80	1.062	1.011	1.001	1.027	1.009	0.977	1.001
	100x100	1.069	1.027	1.004	1.013	1.014	1.025	1.000

TABLE 7. $k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$ factor for the W1 Exradin Standard Imaging PSD in liquid water.

Jaw Field Size [mm ²]								
		8x8	14x14	20x20	44x44	60x60	80x80	98x98
mMLC Field Size [mm ²]	6x6	0.978	0.948	0.951	0.927	0.949	0.937	0.938
	12x12	1.035	1.011	1.021	1.032	1.018	1.015	1.018
	18x18	1.012	1.047	1.040	1.030	1.041	1.025	0.984
	24x24	1.010	1.040	1.047	1.036	1.042	1.041	1.059
	30x30	1.027	1.020	1.055	1.044	1.038	1.041	1.030
	36x36	1.008	1.030	1.037	1.032	1.021	1.042	1.056
	42x42	1.025	1.036	1.041	1.044	1.044	1.040	1.024
	60x60	1.021	1.036	1.036	1.043	1.037	1.033	1.036
	80x80	1.006	1.028	1.027	1.049	1.026	0.987	1.009
	100x100	1.014	1.042	1.030	1.036	1.030	1.031	1.000

TABLE 8. $k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$ factor for the PTW 60017E.

		Jaw Field Size [mm ²]						
mMLC Field Size [mm ²]		8x8	14x14	20x20	44x44	60x60	80x80	98x98
	6x6	1.206	1.075	1.085	1.058	1.082	1.069	1.070
	12x12	1.231	1.023	1.031	1.043	1.031	1.027	1.031
	18x18	1.204	1.050	1.026	1.018	1.029	1.014	0.973
	24x24	1.201	1.044	1.031	1.018	1.027	1.025	1.042
	30x30	1.220	1.023	1.040	1.024	1.018	1.024	1.011
	36x36	1.202	1.036	1.024	1.013	1.004	1.025	1.038
	42x42	1.221	1.041	1.027	1.026	1.026	1.024	1.008
	60x60	1.216	1.039	1.023	1.025	1.025	1.021	1.024
	80x80	1.198	1.035	1.012	1.032	1.014	0.981	1.004
	100x100	1.207	1.046	1.017	1.019	1.019	1.027	1.000

TABLE 9. $k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$ factor for the PTW 31016.

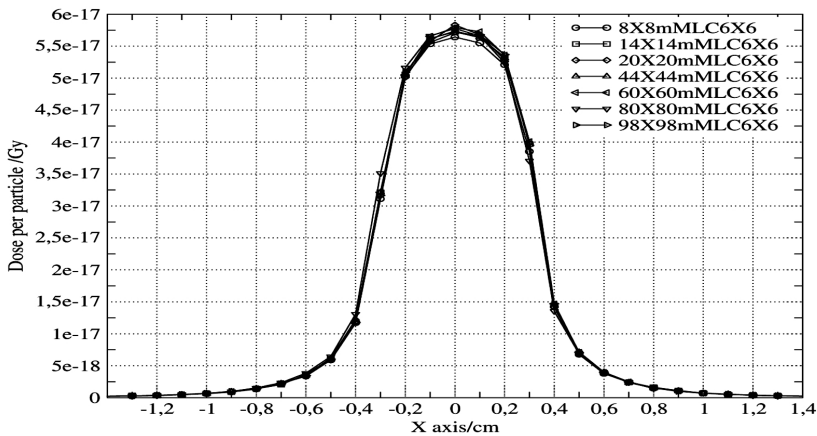


FIGURE 3. Monte Carlo dose profiles for sub-centimeter radiation fields at 10 cm depth.

Figure 4 shows the Monte Carlo dose profiles calculated at 10 cm depth for the sub-centimeter radiation fields along the first column of the table.

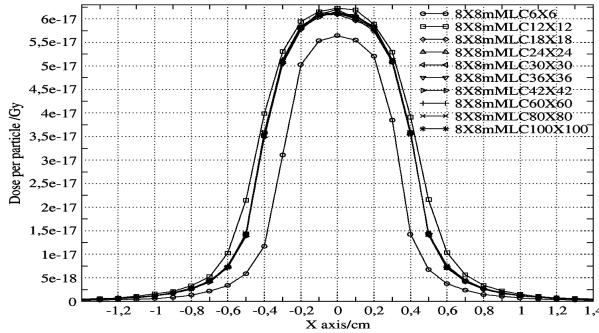


FIGURE 4. Monte Carlo dose profiles for sub-centimeter radiation fields at 10 cm depth.

Figures 5 shows the comparison of dose profiles calculated by Monte Carlo and measured with the set of detectors for the smallest sub-centimeter field of the table.

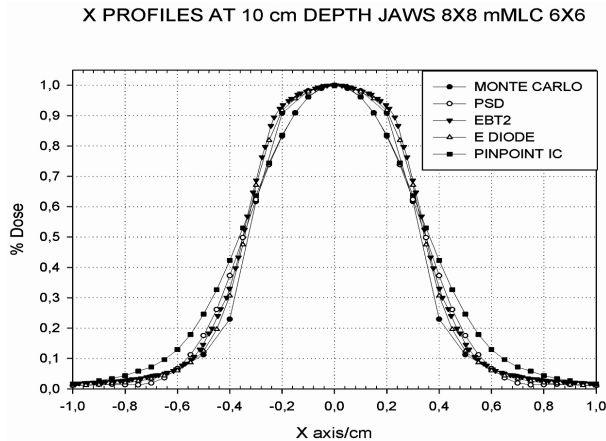


FIGURE 5. Comparison of the cross profile for the smallest radiation field.

Figure 6 shows the percent depth dose curves calculated by Monte Carlo for the sub-centimeter fields along the first row of the table.

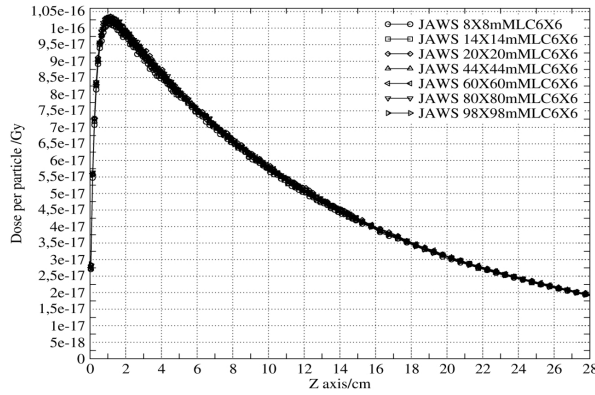


FIGURE 6. *Percentage Depth Dose curves for sub-centimeter radiation fields.*

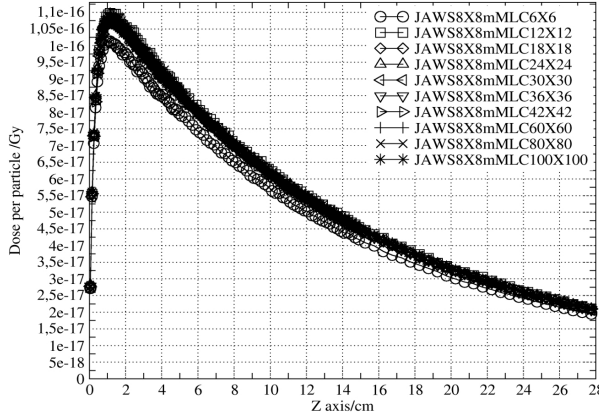


FIGURE 7. *Percentage Depth Dose curves for sub-centimeter radiation fields.*

Figure 7 shows the percent depth dose curves calculated by Monte Carlo for the sub-centimeter fields along the first column of the table.

Figure 8 shows the comparison of dose profiles calculated by Monte Carlo and those measured by the set of detectors for small fields with sizes just larger than the range of secondary charged particles.

Figure 9 shows the influence of radiation field size on the magnitude of the correction factor. Also from the graph, it can be seen a threshold below which, detectors show large discrepancies among themselves.

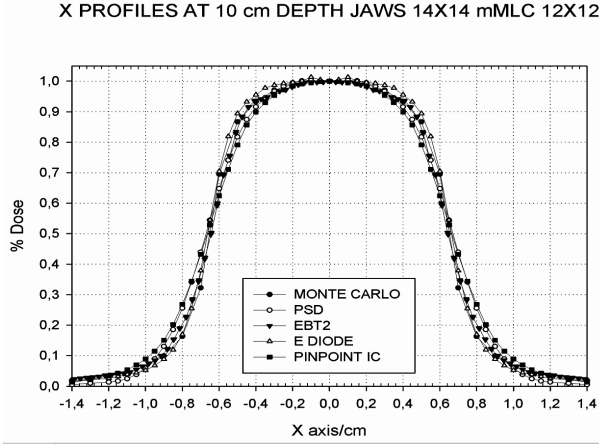


FIGURE 8. *Comparison of cross profiles for a not sub-centimeter radiation field.*

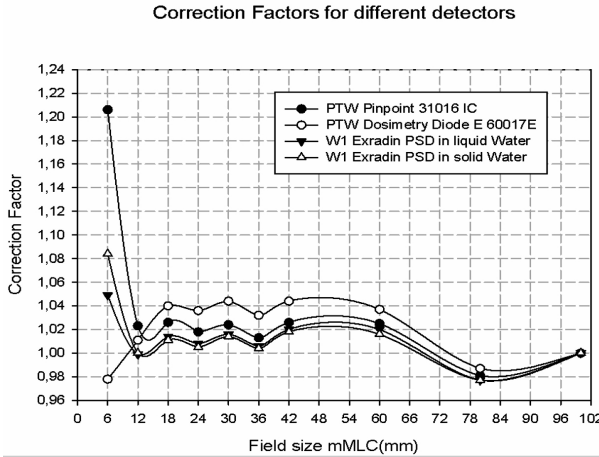


FIGURE 9. *Correction Factor $k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$ for a set of stereotactic detectors as a function of field size.*

Discussion

The observation of the $k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$ correction factor tables for the group of stereotactic detectors studied in this work shows that for radiation field sizes with radius larger than the range of secondary charged particles, regions where lateral charged-particles equilibrium exists, all the correction factors are lower than 7%

compared to Monte Carlo calculations. However, for sub-centimeter radiation fields, the $k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$ correction factors reach values with differences relative to Monte Carlo results of up to 23% for the PTW Pinpoint ionization chamber 31016, 12% for the W1 PSD in solid water, 9% for the W1 PSD in liquid water and 4% for the PTW 60017E diode. This fact is endorsed by the Figure 9 where some radiation fields have been selected to illustrate the behavior of correction factor $k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$ versus the size of the radiation field.

The more affected detector by the lack of lateral equilibrium in sub-centimeter radiation fields is the micro ionization chamber because of its sensitive volume composed by air which increases the perturbation factor and the volume averaging effect.

Although, the unshielded diode shows low correction values for the sub-centimeter field sizes compared to the Monte Carlo calculations, the high atomic number of its sensitive volume made of silicon of 14 in comparison to water with an effective atomic number of 7.5 increases the absorption of low energy photons and hence compromises the accuracy of the dosimeter. The density of the Plastic Scintillation Detector nearly equivalent to water and its small size are factors that decrease the averaging errors in the measurement and in general the perturbation of the dosimeter. The correction factors for both solid and liquid water were lower than 12% for sub-centimeter fields but less than 3% for the rest of the radiation fields. The volume of the scintillation fiber of about 2.36 mm^3 used in the present study is still large compared to the volume of other noncommercial experimental plastic scintillators like those reported in the literature[32] with volumes of 0.196 mm^3 and 0.785 mm^3 .

The under-response of the plastic scintillation detector along the first column of the tables may be related to the refractive index of PMMA which is higher for shorter wavelengths.[21] The broad penumbra in sub-centimeter fields containing low energy photons produces changes in the Cherenkov spectrum in comparison to the calibration condition, which contributes to the error in the measurements. Despite of the 23% error found with the pinpoint

ionization chamber for the radiation fields with radius smaller than the range of secondary charged particles, corrections of about 2% are found for the larger radiation fields. This fact confirms that ionization chambers continue to be one of the most accurate radiation detectors but not indicated for the dosimetry of sub-centimeter radiation fields.

Figure 3 shows the Monte Carlo cross dose profiles for different configurations of sub-centimeter radiation fields delimited by multiple apertures of jaws and effective field size of 6 mm determined by the mMLC. Each graph corresponds to a different Monte Carlo simulation but the similar behavior of the set, endorses the reproducibility of the Monte Carlo BEAMnrc and DOSXYZnrc codes used in this work.

Figure 4 shows the Monte Carlo cross dose profiles for sub-centimeter radiation fields but this time the effective field size of 8 mm is determined by the jaws of the linac apart from the (8 mm jaws, 6 mm mMLC) field which is one of the Figure 3. The behavior of the (8 mm jaws, 12 mm mMLC) field at the penumbra region is different from the rest of its equivalent radiation field sizes. The presence of larger number of low energy photons at the vicinity of the measuring point increases the penumbra. This is one of the reasons why a stereotactic detector with high resolution to discriminate multi-energetic spectrums is required for the dosimetry of small photon fields.

Figure 5 shows differences in the penumbra region for the cross profile of the smallest radiation field calculated by Monte Carlo and measured by the pinpoint ionization chamber. The 31016-pinpoint chamber over responds due to the low density of its sensitive volume. This fact points to the importance of the selection of the appropriate detector when doing the commissioning of treatment planning systems dedicated to stereotactic treatments. Figures 6 and 7 show the percentage depth dose curves calculated by Monte Carlo for different configurations of sub-centimeter fields which were found in good agreement with the ones measured with the set of detectors.

Jaw Field Size [mm ²]								
mMLC Field Size [mm ²]		8x8	14x14	20x20	44x44	60x60	80x80	98x98
	6x6	0.803						
	12x12		0.000					
	18x18			-0.390				
	24x24				-0.246			
	30x30				-0.361			
	36x36				-0.355			
	42x42				-0.466			
	60x60					-0.330		
	80x80						-0.104	
	100x100							0.000

TABLE 10. Differences in percentage respect to a similar work for the PTW 60017E.

Figure 8 shows that for radiation fields with radius larger than the range of the secondary charged particles, the cross-dose profiles calculated by Monte Carlo match the profiles measured with the set of stereotactic detectors. This fact endorses the concept that the $k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$ correction factor tends to unity as the radiation field size gets larger beyond the electrons lateral equilibrium radius and that the $k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$ correction factor is related directly with variations with the incident energy spectrum.

A published study[33] has used several detectors to measure output and correction factors of some linear accelerators equipped with micro-multileaf collimators. Table 10 shows the percentage difference of that results compared to those obtained in this work, for the same detector PTW 60017E, the same field sizes and under the same experimental conditions.

Another study[6] selected a group of detectors dedicated to dosimetry of small fields to determine the correction factors due to the volume of the detectors. The work used the BrainLab[®] micro-multileaf collimator to determine the radiation fields but

did not specify the setting of the collimator jaws. The reported corrections agree to the ones obtained in this work.

Conclusions

Stereotactic detectors show large discrepancies among themselves when they are used to measure output factors and dose profiles for sub-centimeter radiation fields. The measurements obtained by the plastic scintillation detectors show good agreement in comparison with the Monte Carlo simulation results. Improvements on the calibration method and developments of smaller volumes of scintillating fibers will increase the accuracy of the system to measure sub-centimeter radiation fields.

The unshielded diode PTW 60017E is a very accurate tool for the measurement of output factors and dose profiles of sub-centimeter radiation fields. However, its higher density in comparison to water induces an over-response when photoelectrons are crossing the detector.

It is important to include Monte Carlo simulations when doing the commissioning of treatment planning systems, when these systems are used to plan radiosurgery treatments. Air volume ionization chambers are not recommended for the commissioning of stereotactic treatment planning systems. Especially for sub-centimetric radiation fields.

This work has presented tables of $k_{Q_{clin}, Q_{msr}}^{f_{clin}, f_{msr}}$ correction factors for the set of detectors studied that may be applied to adjust the measurements of output factors and dose profiles required by the commissioning of treatment planning systems. However, it is important to continue the search of the dosimeter with negligible corrections that may be recommended in calibration protocols of sub-centimeter fields. The plastic scintillation detector seems to be a good candidate.

Recently, companies developing treatment planning systems for stereotactic radiation treatments have informed about the discrepancies between the irradiation time predicted by their

planning systems and the actual dose prescribed to the patients when the size of the radiation fields are on the order of sub-centimeters and new solutions of software are being offered to the radiotherapy facilities to improve the accuracy of their planning systems but better detectors are still required.

Acknowledgements

This work was done with the support of the non-profit organization Hospital Universitario de San Vicente Fundación and the Institute of Physics of the Universidad de Antioquia through the CODI project of the group of magnetism and Simulation and the exclusive dedication program (J.R).

Thanks to Varian Medical Systems for providing the geometrical details of the Varian Linac used to create the Monte Carlo model.

References

- [1] I. J. Das, G. X. Ding, and A. Ahnesjö, *Med. Phys.* **35**, 206 (2008).
- [2] P. Francescon, W. Kilby, N. Satariano, and S. Cora, *Phys. Med. Biol.* **57**, 3741 (2012).
- [3] E. Benítez, F. Casado, S. García-Pareja, J. Martín-Viera, C. Moreno, and V. Parra, *Radiat. Meas.* **58**, 79 (2013).
- [4] P. Papaconstadopoulos, F. Tessier, and J. Seuntjens, *Phys. Med. Biol.* **59**, 5937 (2014).
- [5] T. S. A. Underwood, B. C. Rowland, R. Ferrand, and L. Vieilleveigne, *Phys. Med. Biol.* **60**, 6669 (2015).
- [6] G. Azangwe, P. Grochowska, D. Georg, J. Izewska, J. Hopfgartner, W. Lechner, C. E. Andersen, A. R. Beierholm, J. Helt-Hansen, H. Mizuno, A. Fukumura, K. Yajima, C. Gouldstone, P. Sharpe, A. Meghzifene, and H. Palmans, *Med. Phys.* **41**, 072103 (2014).
- [7] A. Beierholm, C. Behrens, and C. Andersen, *Radiat. Meas.* **69**, 50 (2014).

- [8] D. Létourneau, J. Pouliot, and R. Roy, *Med. Phys.* **26**, 2555 (1999).
- [9] M. Yarahmadi, H. Nedaie, M. Allahverdi, K. Asnaashari, and O. Sauer, *Int. J. Radiat. Res.* **11** (2013).
- [10] T. Kairn, N. Hardcastle, J. Kenny, R. Meldrum, W. A. Tomé, and T. Aland, *Australas. Phys. Eng. Sci. Med.* **34**, 333 (2011).
- [11] M. N. Amin, R. Heaton, B. Norrlinger, and M. K. Islam, *J. Appl. Clin. Med. Phys.* **12**, 50 (2011).
- [12] C. Wong, T. Ackerly, C. He, W. Patterson, C. Powell, G. Qiao, D. Solomon, R. Meder, and M. Geso, *Radiat. Meas.* **44**, 249 (2009).
- [13] A. Pradhan, J. Lee, and J. Kim, *J. Med. Phys.* **33**, 85 (2008).
- [14] C. Andersen, S. Damkjar, G. Kertzscher, S. Greilich, and M. Aznar, *Radiat. Meas* **46**, 1090 (2011).
- [15] F. Chen, C. F. Graeff, and O. Baffa, *Appl. Radiat. Isot.* **62**, 267 (2005).
- [16] J. D. Fenwick, S. Kumar, A. J. D. Scott, and A. E. Nahum, *Phys. Med. Biol.* **58**, 2901 (2013).
- [17] A. J. D. Scott, S. Kumar, A. E. Nahum, and J. D. Fenwick, *Phys. Med. Biol.* **57**, 4461 (2012).
- [18] A. J. D. Scott, A. E. Nahum, and J. D. Fenwick, *Med. Phys.* **36**, 3132 (2009).
- [19] G. X. Ding and F. Ding, *Phys. Med. Biol.* **57**, 5509 (2012).
- [20] C. E. Andersen, *AIP Conf. Proc.* **1345**, 100 (2011).
- [21] J. Lambert, Y. Yin, D. R. McKenzie, S. Law, and N. Suchowerska, *Appl. Opt.* **48**, 3362 (2009).
- [22] M. Guillot, L. Gingras, L. Archambault, S. Beddar, and L. Beaulieu, *Med. Phys.* **38**, 2140 (2011).
- [23] H. Johns and J. Cunningham, *The physics of radiology*, American lecture series (Charles C. Thomas, 1983).
- [24] D. Rogers, B. Walters, and I. Kawrakow, *BEAMnrc Users Manual* (NRC Canada, 2015).
- [25] B. Walters, I. Kawrakow, and D. Rogers, *DOSXYZnrc Users Manual* (NRC Canada, 2015).

- [26] I. Kawrakow, M.-H. E., D. Rogers, F. Tessier, and B. Walters, *The EGSnrc Code System: Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport* (NRC Canada, 2015).
- [27] T. Kairn, T. Aland, R. D. Franich, P. N. Johnston, M. B. Kakakhel, J. Kenny, R. T. Knight, C. M. Langton, D. Schlect, M. L. Taylor, and J. V. Trapp, *Phys. Med. Biol.* **55**, N451 (2010).
- [28] G. Cranmer-Sargison, S. Weston, J. A. Evans, N. P. Sidhu, and D. I. Thwaites, *Med. Phys.* **38**, 6592 (2011).
- [29] I. Kawrakow, D. W. O. Rogers, and B. R. B. Walters, *Med. Phys.* **31**, 2883 (2004).
- [30] I. A. Popescu, C. P. Shaw, S. F. Zavgorodni, and W. A. Beckham, *Phys. Med. Biol.* **50**, 3375 (2005).
- [31] R. Alfonso, P. Andreo, R. Capote, M. S. Huq, W. Kilby, P. Kjäll, T. R. Mackie, H. Palmans, K. Rosser, J. Seuntjens, W. Ullrich, and S. Vatnitsky, *Med. Phys.* **35**, 5179 (2008).
- [32] J. Morin, D. Béliveau-Nadeau, E. Chung, J. Seuntjens, D. Thériault, L. Archambault, S. Beddar, and L. Beaulieu, *Med. Phys.* **40**, 011719 (2013).
- [33] C. Bassinet, C. Huet, S. Derreumaux, G. Brunet, M. Chéa, M. Baumann, T. Lacornerie, S. Gaudaire-Josset, F. Trompier, P. Roch, G. Boisserie, and I. Clairand, *Med. Phys.* **40**, 071725 (2013).

DEPENDENCE OF PHOTONIC BAND GAP ON THE RADIUS OF TRACES IN TiO_2 NANOSTRUCTURES

DEPENDENCIA DEL GAP FOTÓNICO CON EL RADIO DE LAS HUELLAS EN NANOESTRUCTURAS DE TiO_2

**Claudia P. Barrera¹, Heiddy P. Quiroz², Rafael R. Rey¹,
Anderson Dussan²**

¹ Universidad Nacional de Colombia - Bogotá, Dpto. de Física, Grupo de Óptica e Información Cuántica, Cra. 30 No. 45-03 Edificio 405 Of. 207 Ciudad Universitaria, Código Postal 111321, Bogotá, Colombia

² Universidad Nacional de Colombia - Bogotá, Dpto. de Física, Grupo de Materiales Nanoestructurados y sus Aplicaciones, Cra. 30 No. 45-03 Edificio 404 Lab. 121C Ciudad Universitaria, Código Postal 111321, Bogotá, Colombia

(Received: November/2016. Accepted: March/2017)

Abstract

We study the evolution of the photonic gap present in TiO_2 traces, these structures appear in the Ti- TiO_2 interface during titania nanotubes formation. Traces can be modeled like photonic crystal because the dielectric function varies periodically in a bi-dimensional space. We conducted a theoretical study based on experimental measurements in traces of TiO_2 . The study was developed using a plane wave expansion method. This work is a first attempt to introduce photonic gap engineering, which could have technological interests.

Keywords: Photonic crystals, Titania, TiO_2 traces

Resumen

Se estudió la evolución de la brecha de frecuencias fotónicas presente en las huellas de TiO_2 , estas estructuras aparecen en la interfaz Ti- TiO_2 durante la formación de nanotubos de óxido de titanio. Las huellas se pueden modelar como un cristal fotónico debido a que la función dieléctrica varía

periódicamente en un espacio bi-dimensional. Hemos llevado a cabo un estudio teórico sobre la base de mediciones experimentales en las huellas de TiO₂. El estudio se desarrolló mediante el uso del método de expansión en ondas planas. Este trabajo es un primer intento para introducir una ingeniería de brecha fotónica, lo cual puede tener interés tecnológico.

Palabras clave: Cristal fotónico, Dióxido de titanio, Huellas de TiO₂.

Introduction

In the last decades, new materials with large possibilities of technological applications have appeared as a direct consequence of developments in nanoscience. These materials exhibit novel optic, electronic or magnetic properties among others. Among these systems, the photonic materials can manipulate and control the transport of light. In fact, photonic crystals are considered equivalent to semiconductors for the light.[1] The term photonic crystals was introduced in 1987 by Yablonovitch and John.[2, 3] In the last years, there are many expectations on photonic crystals regarding their uses and applications in different fields of knowledge and technology, like medicine, optics, optoelectronics, and telecommunications. An important characteristic of photonic systems is the versatility to be grown in one, two or three dimensions that should permit its integration in optoelectronic devices.

Photonic crystals use the periodic variation of the dielectric function to control the light in a similar way that in crystals happen with the electrons. Generally, photonic crystals are a material or matrix with dielectric constant ϵ_1 , where there are immersed an array of forms made of a second material with dielectric constant ϵ_2 . This picture resembles the atomic organization of a crystal where the space is the first material and the atoms correspond to the second material. So, traditional concepts from electronic band theory are useful in this subject. However, light does not obey the Fermi-Dirac statistics and the second material, “the atoms” can have different shapes: circular, square and triangular, to mention a few examples. Another difference is that there are two different

components in the dispersion relation: Transverse Electric and Transverse Magnetic modes. For this reason it is possible to have photonic band gap (PBG) for either both modes or one of them. The PBG is a function of the geometric properties of the photonic crystal and the difference between the dielectric constants. These characteristics are a powerful tool to develop photonic devices for possible technological applications.

In a recent paper was reported the formation of TiO_2 nanostructures as a secondary effect during the grow of TiO_2 nanotubes[4] for the anodization method.[5] These nanostructures that we will call as traces appeared on the Ti surface and can be visible after remove the nanotubes by mechanical stress. The traces resemble an egg box and present photonic properties. TiO_2 Anatase and Rutile phases were identified in the traces. This work sought to bring a connection between the relevant parameters of the PBG with the radii of the circular forms of traces.

We used a representation of the traces as a photonic system where long cylindrical rods of air were immersed in a TiO_2 matrix. In the xy plane the rods were distributed in a hexagonal array such that a 2D system was formed. The dielectric function remained constant in the z direction. This picture was inspired by SEM micrographs from traces, as we can see in Fig 1(a). Numerical experiments were developed in order to explore the effect produced on PBG when radius of traces changed.

In particular, we studied the evolution of the position and the width of the first partial gap as a function the radii of traces considering both Anatase and Rutile phases for the M and K symmetry points. The traces packing factor dependence with the radii of TiO_2 traces was determinate. These calculations would enable the acquisition of information to prepare materials with specific characteristics, suitable for practical applications.

Experimental Details

The traces were obtained during TiO_2 nanotube fabrication via mechanical stress of titanium foils [6]. The nanotubes were obtained by electrochemical anodization of titanium foils of 2×4

cm, 50 m thickness and 99.96% pure used as anode and cathode in a solution of ethylenglicol, distilled water, and ammonium fluoride (NH_4F). The applied voltage was alternated between 80 and 20 V for 2 h.[6]

Figure 1 shows the SEM micrograph of the traces and their reconstruction. Figure 1b) is the reconstruction of the traces' topography from SEM micrographs, evidencing the honeycomb formation: one trace accompanied for 6 neighboring. This is associated to the self-organization of the nanotubes by anodized process.[6] The reconstruction was realized through to the transform the 2D image uses pixel width, height, and voxel depth as scaling factors to convert voxel coordinates, in this case the scale for the voxel is nm. Height and volume of the image are created by using the alpha value in the Transfer Function that indicates the transparency of every pixel, depending on its intensity. Pixels with low intensity values are usually more transparent (low alpha), while pixels with high intensity values are more opaque (high alpha).[7]

Figure 1a) shows the topography of traces in different regions: regions **i** and **ii** evidence deformations in the traces associated to the imperfections in the titanium foils, replicated during the formation of the nanotubes after anodizing; while region **iii** shows the self-ordered traces reconstructed in Figure 1b), evidencing that the traces have a honeycomb formation.

0.1. Theoretical Model

From Maxwell equations and considering the absence of external currents and sources, it is possible to find a master equation that governs the study of photonic crystals [8–12] given for Eq. (1):

$$\left\{ \nabla \times \frac{1}{\epsilon(r)} \nabla \times \right\} H(r) = \omega^2 H(r). \quad (1)$$

This equation represents a linear Hermitian eigenvalue problem, where the term inside of parenthesis is the Hermitian differential operator Θ . Its solution implies a variational approach, where each

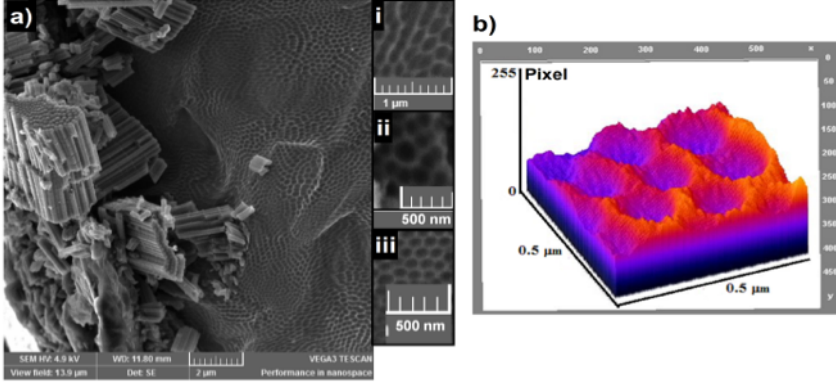


FIGURE 1. (a) SEM micrograph of TiO_2 traces and the nanotubes. In **i**, **ii** and **iii** panels the traces can be better observed. (b) Reconstruction of traces from SEM images.

eigenvalue is computed separately by minimizing the functional $\langle H_n | \Theta | H_n \rangle$. [3] In this method, the electric and magnetic fields are expanding into a set of harmonic modes. The solutions of Eq. (1) depend of the dielectric function $\epsilon(r)$ properties than in the present model varies in two dimensions forming a 2D photonic crystal where the air cylindrical rods form a hexagonal pattern. In 2D photonic lattices appear two principal non degenerated components of the electromagnetic field: transverse magnetic (TM), and transverse electric (TE) modes. [13, 14]

Traces are modeled as a bi-dimensional system forms by a TiO_2 matrix, in the Anatase ($\epsilon = 5.62$ [13, 14]) and Rutile ($\epsilon = 6.33$ [13, 14]) phases and air cylinders inside them. The parameters used for the simulation using the MIT Photonic-Bands (MPB) [15, 16] code are: lattice parameter $a=100\text{nm}$, radii of traces varying between 12 nm and 42nm, and for numerical optimization a grid size of 100×100 points, 12 bands and 900 points in the reciprocal space for the dispersion relation were used. $\Gamma = (0, 0, 0)$, $M = (0, 1/\sqrt{3}, 0)$ and $K = (1/3, 1/\sqrt{3}, 0)$ were the respective high symmetry points used. To conduct the study, we began from the experimental measurement of the traces (83.53 ± 1.93 nm), establishing the radii of 42nm as reference to perform the simulations.

Results and Discussion

This theoretical study sought to identify the evolution of partial gaps of the TE and TM modes as a function of the size of the radius of TiO₂ traces. This artificial material exhibits a photonic behavior and presents a hexagonal array, which has the matrix of Anatase and Rutile phases (black) with air cylinders in the representation of TiO₂ traces (white) Fig. 2(a-d), with radii of cylinders varying from 12 nm to 42 nm. When the radius of traces increases, the packing factor P_F , the relation between the occupied area of air cylinders and TiO₂ matrix increases with a quadratic behavior, following the equation $P_F = 2\pi r^2 / (a^2 \sqrt{3})$, $r \leq 2a$, which is for 2D hexagonal lattices. The packing factor is shown in Fig. 2(e). The photonic band structures obtained for Anatase and Rutile phases are shown in Figs. 4 to 7 for radii of 12 nm, 22 nm, 32 nm, and 42 nm, respectively.

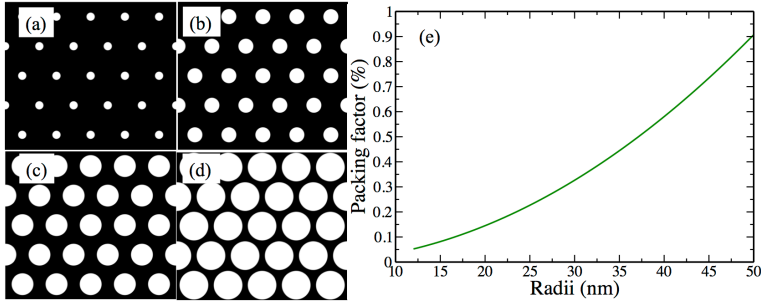


FIGURE 2. *Schematic representation of the traces for different radii: (a) $r = 12$ nm, (b) $r = 22$ nm, (c) $r = 32$ nm, (d) $r = 42$ nm, (e) Variation of the packing factor with the radius of traces.*

The increase of the partial gap of TE mode (TE) is shown for both phases of TiO₂. This region defines the frequencies in which the light cannot propagate in the periodical photonic crystal of TiO₂-air implemented in this study. When the radii of traces are small ($r = 12$ nm, Fig. 2(a)), in comparison to reference radius of 42 nm (Fig. 2 (d)), the gap region is not open; the dielectric and air band has a very close frequency value, which inhibits the appearance of gaps (Fig. 3).

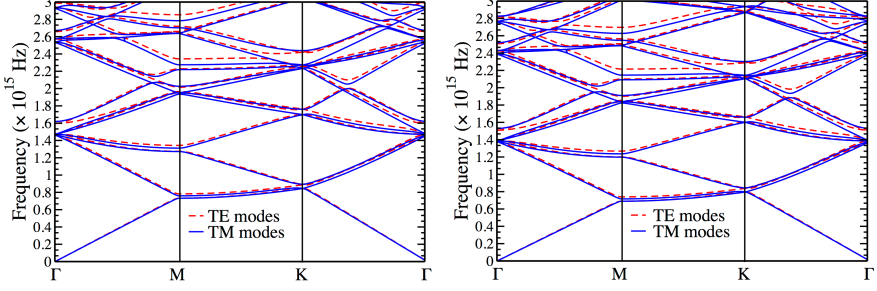


FIGURE 3. Photonic band structure, TE modes (red) and TM modes (violet), for a honeycomb lattice model with a matrix of Anatase (a) and Rutile (b) phases of TiO_2 and traces with radii $r = 12\text{nm}$.

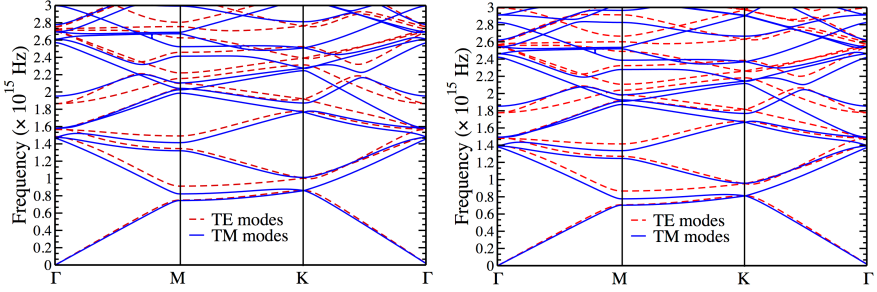


FIGURE 4. Photonic band structure, TE modes (red) and TM modes (violet), for a honeycomb lattice model with a matrix of Anatase (a) and Rutile (b) phases of TiO_2 and traces with radii $r = 22\text{nm}$.

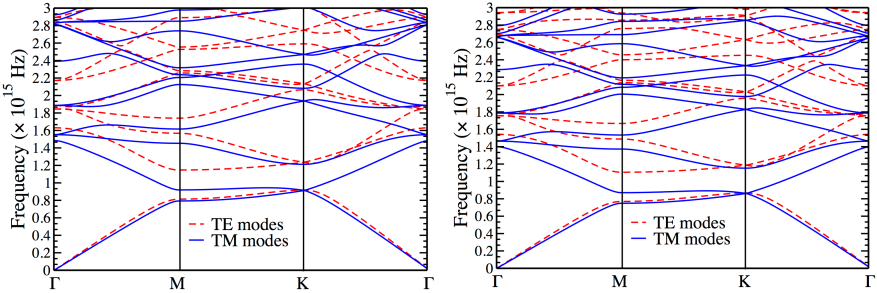


FIGURE 5. Photonic band structure, TE modes (red) and TM modes (violet), for a honeycomb lattice model with a matrix of Anatase (a) and Rutile (b) phases of TiO_2 and traces with radii $r = 32\text{nm}$.

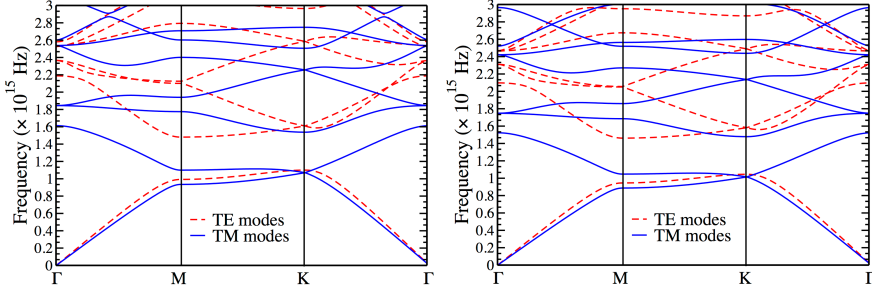


FIGURE 6. Photonic band structure, TE modes (red) and TM modes (violet), for a honeycomb lattice model with a matrix of Anatase (a) and Rutile (b) phases of TiO_2 and traces with radii $r = 42\text{nm}$.

Figure 6 shows the maximum value of the photonic band gap region, corresponding to the radius taken as reference. This value is obtained from SEM micrographs of TiO_2 nanotubes.[6] For this case, the first band gap for TE modes has an interesting property: the lowest state of second band occurs at M point while the highest state of first band is at K point. This behavior is similar as the indirect electronic gap in semiconductors. For this reason, the effectively gap for light transportation must take in account this characteristic. However, photons obey Bose-Einstein statistics and direct-like transitions can happen. This effective gap disappears for radius lower than 22 nm even that at K or M point is possible to observe a local gap, see Figs. 3 to 6.

The evolution of the central frequency of the local gap, for M and K point, as function of radius in Anatase and Rutile phases are shown in Figs. 7. Local gap at K point is higher than local gap at M point for both modes and phases.

Conclusions

A study of the effect of the change in the radii of TiO_2 traces on the properties of gaps for a 2D photonic material compose of Titania (Anatase and Rutile phases) - air hole was conducted. From them, it is possible to determine that the value of the photonic gap increases, according to the radii increase. This behavior is observed both K and M high symmetry points. In the same form, the

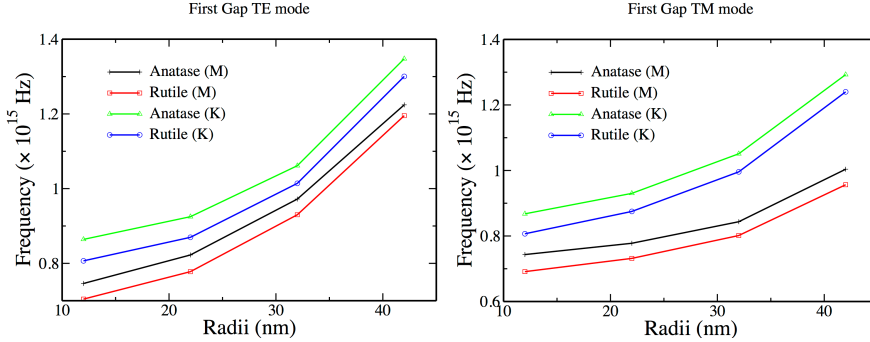


FIGURE 7. . Dependence of central frequency value on the radii of traces in the first partial gap of TE (Left panel) and TM (Right panel) modes for Anatase and Rutile phases in M and K high symmetry points.

photonic gap could be tuned with the packing factor which can be considered a new tool more useful in technology applications. Our results predict a threshold of 150 THz for the maximum value of the central frequency of the first photonic gap when the packing factor reaches the maximum value of 0.906 for a 2D hexagonal lattice.

Acknowledgements

This work was partially supported by the Universidad Nacional de Colombia – DIB projects Quipú codes 201010020493, 201010021532 and 201010026656. Also, it was partially financed by Colciencias, project code Quipú No. 201010019609.

References

- [1] E. Yablonovitch, Phys. Rev. Lett. **58**, 2059 (1987).
- [2] S. John, Phys. Rev. Lett. **58**, 2486 (1987).
- [3] A. Tan, B. Pingguan-Murphy, R. Ahmad, and S. Akbar, Ceram. Int. **38**, 4421 (2012).
- [4] J. Joannopoulos, S. Johnson, J. Winn, and R. Meade, *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light* (Princeton University Press, 2011).
- [5] H. P. Quiroz and A. Dussan, in *Key Engineering Materials V*,

- Adv. Mater. Res., Vol. 1119 (Trans Tech Publications, 2015) pp. 121–125.
- [6] H. P. Quiroz and A. Dussan, J. Appl. Phys. **120**, 051703 (2016).
- [7] K. Inoue and K. Ohtaka, *Photonic Crystals: Physics, Fabrication and Applications*, Springer Series in Optical Sciences (Springer Berlin Heidelberg, 2004).
- [8] C. Soukoulis, *Photonic Band Gap Materials*, Nato Science Series E: (Springer Netherlands, 2012).
- [9] J. Joannopoulos, S. Johnson, J. Winn, and R. Meade, *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light* (Princeton University Press, 2011).
- [10] D. Pagnoux, J. Lourtioz, P. de Fornel, H. Benisty, V. Berger, J. Gerard, D. Maystre, and A. Tchebnokov, *Photonic Crystals: Towards Nanoscale Photonic Devices* (Springer Berlin Heidelberg, 2008).
- [11] P. Hohenberg and W. Kohn, Phys. Rev. **136**, B864 (1964).
- [12] K. M. Ho, C. T. Chan, and C. M. Soukoulis, Phys. Rev. Lett. **65**, 3152 (1990).
- [13] S.-D. Mo and W. Y. Ching, Phys. Rev. B **51**, 13023 (1995).
- [14] C. P. Barrera-Patiño, H. P. Quiroz, R. R. Rey-González, and A. Dussan, Adv. Mater. Lett. **7**, 802 (2016).
- [15] “MIT Photonic Bands - AbInitio,” (2017), http://ab-initio.mit.edu/wiki/index.php/MIT_Photonic_Bands.
- [16] S. G. Johnson and J. D. Joannopoulos, Opt. Express **8**, 173 (2001).

ESTUDIO TEÓRICO DEL FERROMAGNETISMO DE LA SUPERFICIE m-GaN DOPADA CON Mn

THEORETICAL STUDY OF SURFACE FERROMAGNETISM m-GaN DOPED WITH Mn

Oscar Martínez, William López, Alvaro González, Rafael González

Grupo de Investigación en Física Aplicada, Departamento de Física, Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia.

(Recibido: Septiembre/2016. Aceptado: Febrero/2017)

Resumen

Se realizaron cálculos de primeros principios para estudiar las propiedades estructurales, electrónicas y magnéticas de la superficie m-GaN dopada con manganeso (Mn). Este dopaje generó un momento magnético total de $4 \mu_B$ debido a la interacción de los estados 2p-N y 3d-Mn. Se encontró que el dopaje de Mn es responsable del 82 % de la magnetización total de la superficie. Además, el dopaje generó cambios estructurales en la superficie y se evidenciaron en las distancias entre las capas atómicas “ d_{12} , d_{23} , d_{34} , d_{45} ”. La superficie mostró propiedades de metal y semiconductor simultáneamente, estos materiales son llamados “half-metalic”, dependiendo de la polarización del espín. Se determinó la posición sustitucional del dopaje más estable energéticamente, así mismo se observó que este dopaje generó menos cambios estructurales como lo muestran los porcentajes de cambio en las distancias entre capas atómicas “ Δd_{12} , Δd_{23} , Δd_{34} , Δd_{45} ”.

Palabras clave: Densidad de estados, magnetismo superficial, nitruro de galio, teoría del funcional densidad.

Abstract

First principles calculations were performed to study the structural, electronic and magnetic properties of the surface of m-GaN doped with manganese (Mn). This doping generated total magnetic moment $4 \mu_B$ due to interaction of the 2p-N and Mn 3d-states. It was found that doping of Mn is responsible for 82 % of the total magnetization of the surface. In addition, doping generated structural changes in the surface which were evident in the distances between the atomic layers “ d_{12} , d_{23} , d_{34} , d_{45} ”. The surface showed metal and semiconductor properties simultaneously. These materials are called “half-metallic” depending on the spin polarization. Substitutional position of the most stable energy doping was determined, and was observed that doping generated less structural changes as that shown by the changes in the distance between atomic layers “ Δd_{12} , Δd_{23} , Δd_{34} , Δd_{45} ”.

Keywords: Density of states, surface magnetism, gallium nitride, density functional theory.

1. Introduction

La continua construcción de dispositivos electrónicos más pequeños con varias funciones y menor consumo energético, es lo que ha impulsado la tecnología del uso del espín del electrón, además de su carga eléctrica como portador de información [1, 2]. El uso del espín es en la actualidad una de las áreas de investigación más activa en la ciencia de materiales y promete una verdadera revolución en la electrónica [3, 4]. Recientes estudios predicen que el nitruro de galio (GaN) dopado con metales de transición podrían exhibir ferromagnetismo a temperatura ambiente [2]. El GaN es un semiconductor de banda prohibida ancha que al doparlo con Mn presenta una magnetización de $4\mu_B$ [5]. Debido a esta magnetización y pensando en sus aplicaciones en dispositivos espintrónicos y optoelectrónicos, tales como memorias de alta velocidad, sensores magnéticos integrados y biodetectores, se ha motivado el estudio teórico y experimental del GaN dopado con Mn en los últimos años. Dichos dispositivos podrían funcionar

con menor consumo de energía y mayor capacidad para el procesamiento de datos [6, 7].

El ferromagnetismo del dopaje de nitruro de galio con metales de transición ha sido un tema controversial debido a las diferencias obtenidas en la magnetización cuando se aplican distintas técnicas de crecimiento, estas diferencias en la magnetización motivan el intenso trabajo para conocer el ferromagnetismo en el dopaje de GaN con manganeso (Mn) [8]. Este dopaje produce un semiconductor magnético diluido (SMD) debido a que se puede inducir magnetismo permanente a temperatura ambiente en GaN con impurezas de Mn [2]. Existen otros SMD como son: el óxido de zinc (ZnO) dopado con Mn, con momento magnético de $1.2 \mu_B$ con 4 % de Mn [9] y el arseniuro de galio (GaAs) dopado con Mn muestra un momento magnético $3.84 \mu_B$ con 3 % de Mn [10]. Este último tiene una temperatura de Curie inferior a la temperatura ambiente siendo esto un limitante para su utilización en dispositivos para espintrónica [11]. Por otro lado, el estudio del magnetismo en superficies ha sido estudiado en otros materiales como el nitruro de aluminio dopado con magnesio (AlN:Mg), donde se ha encontrado que la estabilidad de estas superficies varía de una a otra, debido a la localización de los momentos magnéticos en la superficie. Estudios anteriores atribuyen el magnetismo a defectos en la superficie. Por lo tanto, la identificación del magnetismo en la superficie es importante para la espintrónica [12].

2. Metodología

El estudio computacional se realizó con el método pseudopotencial en el marco de la teoría del funcional de densidad (DFT) [13]. Los electrones internos fueron descritos por el método proyector de onda aumentada (PAW) [14, 15], en el que los estados $3d$ para el Ga se incluyeron como electrones de valencia. Los cálculos de energía total se realizaron con el paquete de simulación VASP (Vienna Ab initio Simulation Package) [16, 17]. La función de onda de los electrones se expandió en ondas planas hasta una energía de corte de 550 eV. Una malla centrada en gamma de $6 \times 6 \times 1$ puntos k , se utilizó para el muestreo de la zona de Brillouin irreducible de la

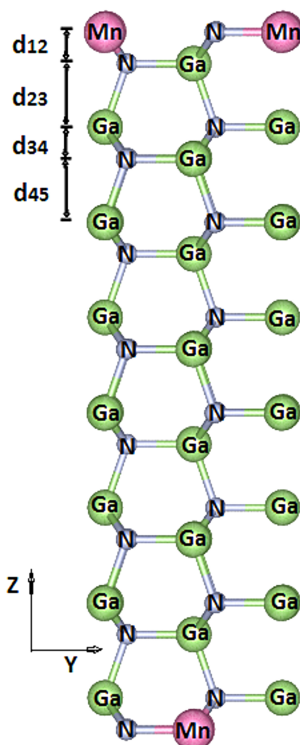


FIGURA 1. Estructura del plano *m* de GaN dopado con Mn. Se muestra la estructura con Mn en la capa1.

superficie no polar, en el esquema especial Monkhorst-Pack [18]. Se adoptó la técnica smearing de Methfessel-Paxton con una anchura de 0.20 eV [19]. Estos parámetros garantizan una convergencia menor que 1 meV para la energía total. La superficie no polar *m*-GaN se modeló usando el enfoque de súpercelada, donde se aplican las condiciones de contorno periódicas a una celda central, de modo que se repite periódicamente en todo el espacio tridimensional. Una terraza simétrica de dieciséis capas de GaN se utilizará para simular la superficie *m*-GaN ($10\bar{1}0$) como lo muestra la figura 1. Se seleccionó una región de vacío de ~ 16 Å en la dirección ortogonal a las superficies. Con el fin de mantener la simetría de la terraza para los cálculos de energía superficial, las capas centrales fueron fijadas en posiciones en volumen de GaN; mientras que en las cuatro capas de la superficie se relajaron las posiciones atómicas.

La incorporación se realizó en ambos lados de cada terraza. Las optimizaciones estructurales finalizaron cuando la magnitud de la fuerza que actúa sobre cada ion era menos de 1 mRy/Bohr.

3. Análisis de resultados

	d_{Mn-N} (Å)	E_F (eV)	ϕ (eV)	$MMT(\mu_B)$	$MMT_{Mn}(\mu_B)$	Δd_{12} (%)	Δd_{23} (%)	Δd_{34} (%)	Δd_{45} (%)
Limpia	1.966	1.650	5.674	0.000	—				
Capa1	1.829	0.618	3.936	4.041	3.421	-15.431	2.971	-1.913	0.443
Capa2	1.895	0.927	3.902	3.991	3.114	-19.673	3.626	-2.405	0.567
Capa3	1.949	1.104	5.077	4.000	3.349	-26.516	7.829	-1.249	1.103

TABLA 1. *Distancia de enlace entre Mn y su primer vecino de N (d_{Mn-N}), energía de Formación E_F (eV), función de trabajo ϕ (eV), momento magnético total $MMT(\mu_B)$, momento magnético del manganeso $MMT_{Mn}(\mu_B)$, porcentaje de cambio de la distancia entre capas atómicas Δd_{ij} (%).*

En la Tabla 1, se representa como “limpia” a la superficie m-GaN sin dopaje. Asi mismo, capa1, capa2 y capa3 representan la sustitución de Ga por Mn en la primera, segunda y tercera capa respectivamente. El porcentaje de cambio de la distancia entre capas se calculó de la siguiente forma:

$$\Delta d_{ij} = \frac{d_{ij} - d_{ij}^0}{d_{ij}^0} \cdot 100 \% \quad (1)$$

Donde $i = 1, 2, 3..$ y $j = 2, 3, 4..$, d_{ij} son las distancias entre capas atómicas: por ejemplo en la figura 1, d_{ij}^0 son las distancias entre capas de la superficie sin relajar. En la tabla se observa que al ir introduciendo el Mn en las capas del volumen, es decir en la capa1, capa2 y capa3, la distancia entre el manganeso y nitrógeno (d_{Mn-N}) fueron menor que la distancia d_{Mn-N} en la superficie sin relajar. Se observa que la función trabajo fue menor en la superficie m-GaN dopada con Mn que en la superficie sin relajar, es decir es más fácil desprender electrones de las capas dopadas que de la superficie sin relajar. De la tabla se puede inferir cuál es la capa más estable observando la que presente menor energía de formación, es decir, la capa que emplea menor energía para formar un mol a partir sus elementos, en este caso es la capa1,

por tanto el Mn tenderá a incorporarse en la capa superior. A la vez este dopaje mostró menos cambios estructurales como lo muestran los porcentajes de cambio en las distancias entre capas atómicas “ Δd_{12} , Δd_{23} , Δd_{34} , Δd_{45} ”. La tabla muestra un momento magnético total en promedio de $4 \mu_B$ para la superficie m-GaN dopada con Mn, siendo el dopaje de Mn el elemento responsable del 82 % de la magnetización total de la superficie.

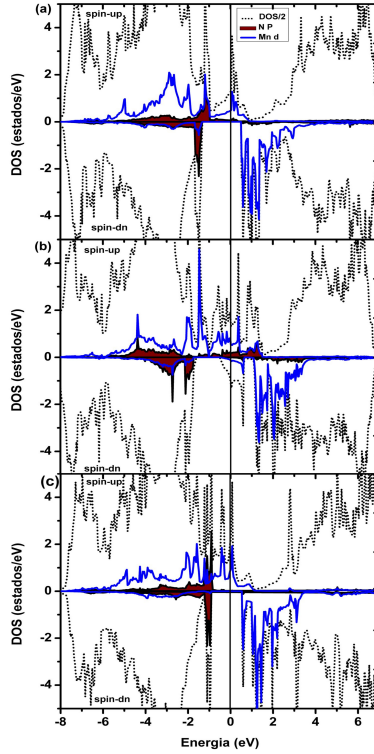


FIGURA 2. Densidad de estados total (DOS) (línea punteada) y parcial (PDOS) del plano m de GaN dopado con Mn. (a) capa1, (b) capa2 y (c) capa3. Estados 3d de Mn (línea gruesa azul) y 2p del Nitrógeno (área color marrón). La energía de Fermi se fija en cero. Las densidades de estado positivas corresponden a la región de espín mayoritario (spin-up) y las negativas a la región de espín minoritario (spin-dn).

En la Figura 2 se presenta la densidad de estados total (DOS) y parcial (PDOS) de la superficie m-GaN dopada con Mn. En la figura 2(a) en la región de espín mayoritario (spin-up) se pueden

observar estados, que cortan el nivel de Fermi (Línea vertical en 0 eV), presentando un comportamiento metálico. Mientras que en la región de espín minoritario (spin-dn) no hay estados cerca del nivel de Fermi, exhibiendo un comportamiento semiconductor con una brecha de energía de ~ 0.5 eV. Este tipo de comportamiento es denominado “half-metalic”.

Con respecto a la densidad de estados parcial (PDOS) en la región spin-up, por debajo del nivel de Fermi, podemos observar una mayor contribución de los estados 3d-Mn (línea gruesa azul) entre el rango de energías de -4 a -1 eV y una menor contribución de los estados 2p-N

References

- [1] G. A. Prinz, *Science* **282**, 1660 (1998).
- [2] T. Dietl, H. Ohno, F. Matsukura, J. Cibert, and D. Ferrand, *Science* **287**, 1019 (2000).
- [3] B. Sanyal, O. Bengone, and S. Mirbt, *Phys. Rev. B* **68**, 205210 (2003).
- [4] S. Datta and B. Das, *Appl. Phys. Lett.* **56**, 665 (1990).
- [5] G.-X. Chen, D.-D. Wang, J.-Q. Wen, A.-P. Yang, and J.-M. Zhang, *Int. J. of Quantum Chem.* **116**, 1000 (2016).
- [6] R. González-Hernández, A. González-García, and W. López-Pérez, *Comp. Mater. Sci.* **83**, 217 (2014).
- [7] N. Theodoropoulou, A. Hebard, D. Norton, J. Budai, L. Boatner, J. Lee, Z. Khim, Y. Park, M. Overberg, S. Pearton, and R. Wilson, *Solid State Electron.* **47**, 2231 (2003).
- [8] S. Gupta, W. Fenwick, A. Melton, T. Zaidi, H. Yu, V. Rengarajan, J. Nause, A. Ougazzaden, and I. Ferguson, *J. Cryst. Growth* **310**, 5032 (2008).
- [9] U. Philipose and G. Sapkota, in *Nanowires - Recent Advances*, edited by X. Peng (InTech., 2012) Chap. 3.
- [10] H. Lin and H. Duan, *Sci. China Ser. G* **51**, 470 (2008).
- [11] L. Kronik, M. Jain, and J. R. Chelikowsky, *Phys. Rev. B* **66**, 041203 (2002).

- [12] S. Chintalapati, Y. Cai, M. Yang, L. Shen, and Y. P. Feng, *Jpn. J. Appl. Phys.* **54**, 110302 (2015).
- [13] W. Kohn and L. J. Sham, *Phys. Rev.* **140**, A1133 (1965).
- [14] P. E. Blöchl, *Phys. Rev. B* **50**, 17953 (1994).
- [15] G. Kresse and D. Joubert, *Phys. Rev. B* **59**, 1758 (1999).
- [16] G. Kresse and J. Furthmüller, *Comp. Mater. Sci.* **6**, 15 (1996).
- [17] G. Kresse and J. Furthmüller, *Phys. Rev. B* **54**, 11169 (1996).
- [18] H. J. Monkhorst and J. D. Pack, *Phys. Rev. B* **13**, 5188 (1976).
- [19] M. Methfessel and A. T. Paxton, *Phys. Rev. B* **40**, 3616 (1989).

LAS CELDAS SOLARES COMO ALTERNATIVA PEDAGÓGICA EN LA ENSEÑANZA DE LA ELECTRICIDAD

SOLAR CELLS AS A PEDAGOGICAL ALTERNATIVE IN THE TEACHING OF ELECTRICITY

Clara L. Calderón, John Aguirre

Departamento de Física, Facultad de Ciencias,
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

(Recibido: Febrero/2017. Aceptado: Junio/2017)

Resumen

En este trabajo se usan las celdas solares para enseñar a los estudiantes de educación media los conceptos básicos de electricidad y la importancia del uso de fuentes de energía renovable y no contaminante para generar electricidad. Para lograr estos objetivos se diseñó y desarrolló un programa de actividades pedagógicas en el cual se usaron diferentes metodologías y se llevaron a cabo varias actividades dentro del proceso de enseñanza-aprendizaje. Las actividades desarrolladas permitieron enseñar a las nuevas generaciones las ventajas de usar la energía solar para obtener energía eléctrica, con respecto al uso de fuentes de energía no renovables que principalmente se usan en la actualidad. Mediante el funcionamiento de un dispositivo de alta tecnología como la celda solar, se enseñaron los conceptos de corriente eléctrica, voltaje, resistencia y potencia eléctrica. La enseñanza de los conceptos de electricidad de esta forma novedosa constituye un ejemplo de innovación en el proceso de enseñanza-aprendizaje en el nivel de educación secundaria, que involucra el fomento del uso de energías provenientes de fuentes renovables en la enseñanza tradicional. El aprendizaje y la motivación de los estudiantes se evidenciaron en el desarrollo de proyectos escolares en los cuales utilizaron las celdas solares.

Palabras clave: Celdas solares, recursos renovables, electricidad, aprendizaje significativo.

Abstract

In this work, solar cells are used to teach middle school students the basic concepts of electricity and the importance of using renewable and clean energy sources to generate electricity. To achieve these objectives, a program of pedagogical activities was designed and developed in which different methodologies were used and several activities were carried out within the teaching-learning process. The activities taught the new generations the advantages of using solar energy to obtain electricity, over the use of non-renewable energy sources that are mainly used today. Through the operation of a high technology device such as the solar cell, concepts of electric current, voltage, resistance and electrical power were taught. Teaching of electricity concepts in this novel way is an example of innovation in the teaching-learning process at the level of secondary education, which involves the promotion of the use of energy from renewable sources in traditional teaching. Learning and motivation of students were evidenced in the development of school projects in which they used the solar cells.

Keywords: Solar cells, renewable resources, electricity, meaningful learning.

1. Introduction

Uno de los mayores retos que enfrenta la humanidad es responder a la demanda constante y creciente de la producción de energía. Para soportarla se requiere del consumo de grandes cantidades de recursos naturales como el carbón y el petróleo, que a su vez requieren grandes inversiones para su extracción y refinamiento generando graves problemas de contaminación ambiental como el deterioro de la capa de ozono, aumento de la temperatura global y la pérdida creciente de recursos vitales como el agua, el aire y el alimento, lo cual desequilibra los ecosistemas naturales. La

solución que está a nuestro alcance es utilizar fuentes de energía renovable, entre ellas el Sol es una fuente importante de energía limpia, inagotable y sin costo; esta fuente energética unida a la tecnología de las celdas solares como instrumento para convertir la energía solar en energía eléctrica, pueden suplir la demanda energética. El uso masivo de celdas solares también contribuiría a bajar los costos de producción y consumo de la energía eléctrica y también sería un elemento determinante en la protección y conservación del medio ambiente. La máxima eficiencia de las celdas solares reportada hasta ahora es 28.8 % [1] y es mayor al usar multi-junturas y concentradores solares, se espera que la eficiencia continúe aumentando a medida que avanzan las investigaciones.

Los recursos naturales no renovables como el gas, el carbón y el petróleo utilizados en la generación de energía están destinados a mediano o largo plazo a desaparecer, lo cual se agrava por el desconocimiento generalizado respecto al uso de energías renovables y el hecho de utilizar en gran mayoría energías convencionales no renovables de origen fósil para generar electricidad, es así como del total de la energía consumida en el planeta el 19.2 % procede de recursos renovables y de este porcentaje solo el 1.4 % proviene de energía solar, eólica y geotérmica [2]. Una forma de enfrentar inicialmente esta situación, es generar conciencia en las personas sobre la importancia y protección de los recursos naturales; por medio del sistema educativo y sus recursos pedagógicos y metodológicos se puede crear en las personas desde temprana edad la suficiente conciencia y motivación para emplear fuentes de energía renovables y utilizar nuevas tecnologías para la generación de energía eléctrica. En este trabajo se fomenta el uso de las energías renovables, principalmente la solar y se aprovecha el funcionamiento de la celda solar para enseñar conceptos básicos de electricidad como voltaje, resistencia corriente y potencia eléctrica, en estudiantes de educación media.

2. Actividades pedagógicas realizadas con los estudiantes

Las actividades se realizaron con 40 estudiantes de educación media (grados 10 y 11 de bachillerato) de un colegio de educación pública del Distrito en Bogotá, Colombia, con edades entre 15 y 18 años.

Se diseñó un programa de actividades pedagógicas para que los estudiantes comprendieran los conceptos básicos de electricidad a partir del funcionamiento de las celdas solares, además de enseñar e incentivar en ellos el uso de los recursos renovables y no contaminantes como alternativa para obtener energía eléctrica. En el fomento del uso de los recursos renovables se hizo énfasis en las ventajas de usar la energía solar para generar electricidad como son: fuente inagotable, no contaminante, silenciosa, sin costo, disponible en cualquier lugar y sin necesidad extracción ni de cableado; con respecto a fuentes convencionales no renovables que se usan en la actualidad. Con el fin de que el aprendizaje de los estudiantes fuese motivante, dinámico y significativo, el programa pedagógico incluyó actividades tales como conferencias, videos, lecturas y taller experimental para elaborar proyectos escolares, como se muestra a continuación (Tabla 1).

El programa se dividió en tres unidades: en la UNIDAD I “MODELOS ATÓMICOS Y PROPIEDADES DE LOS SEMICONDUCTORES” se dan todos los conceptos básicos necesarios para abordar el tema de las celdas solares y su funcionamiento, en la UNIDAD II “ENERGÍA SOLAR Y CELDAS SOLARES” se desarrolla el tema de la energía solar y su aprovechamiento, también se enseñan los conceptos de electricidad a través del funcionamiento de las celdas solares, y la UNIDAD III “CIRCUITOS DE CORRIENTE ELÉCTRICA” se dedica principalmente al tema de los circuitos de corriente eléctrica y los proyectos escolares. Antes de iniciar el programa se realizó una “Prueba Diagnóstica de los temas a tratar” de forma individual para establecer los conocimientos y conceptos previos sobre los temas de la electricidad, las celdas solares y las energías alternativas renovables y la solución ambiental que ellas aportan a la contaminación del planeta. Sus respuestas se tomaron como punto de referencia inicial para diseñar un plan de acción para relacionar los nuevos conocimientos con los ya existentes, de tal forma que la conexión formara el nuevo aprendizaje. El programa se planeó como un camino a través de un aprendizaje significativo [3], de tal forma que cada concepto nuevo fuera aprendido relacionándolo con el anterior, para que los estudiantes se apropiaran finalmente de un conocimiento sólido y

Unidad	Tema	Actividad	Evaluación
	Prueba Diagnóstica de los temas a tratar	Cuestionario escrito individual	
UNIDAD I "MODELOS ATÓMICOS Y PROPIEDADES DE LOS SEMICONDUCTORES"	Modelos atómicos. Introducción a la estructura atómica de la materia	Motivación y presentación del video "El átomo"	Cuestionario escrito individual
	Estructura atómica de la materia	Presentación visual y explicación de los conceptos y propiedades básicas de los modelos atómicos	Cuestionario escrito individual
	Propiedades eléctricas de los materiales. Bandas de energía Semiconductores tipo n y tipo p	Cuestionario escrito diagnóstico. Presentación visual y explicación de los conceptos básicos de los temas	
UNIDAD II "ENERGÍA SOLAR CELDAS SOLARES"	El Sol, el espectro solar y el aprovechamiento de su energía incluyendo la celda solar	Video: "Energía solar limpia e inagotable". Lectura "La energía limpia: ¿ésta a nuestro alcance?"	Cuestionario escrito desarrollado en grupo
	Funcionamiento de la celda solar	Conferencia: Explicación general de los conceptos básicos de corriente, voltaje, potencia y resistencia eléctrica usando la celda solar	
	Promoción en los educandos del uso de recursos renovables y no contaminantes	Motivación: visita al laboratorio para conocer celdas solares, incluye Conferencia funcionamiento celda solar y utilización	Encuesta escrita
UNIDAD III "CIRCUITOS DE CORRIENTE ELÉCTRICA"	Circuitos de corriente eléctrica	Explicación teórica de circuitos básicos y ley de Ohm	
	Laboratorio de Circuitos de Corriente Eléctrica	Práctica de circuitos resistivos por parte de los estudiantes. Desarrollo de proyectos que utilicen celdas solares.	Cuestionarios acerca del Taller experimental. Presentación y evaluación de proyectos escolares.

TABLA 1. Programa pedagógico diseñado para la enseñanza de los conceptos de electricidad y el fomento del uso de los recursos renovables como la energía solar.

duradero. La secuencia de todas las actividades realizadas dentro del programa, sus contenidos y metodología fueron planeadas teniendo en cuenta los recursos didácticos disponibles en el colegio, y para que el estudiante construyera su propio conocimiento guiado por el docente. Para diseñar el programa pedagógico el docente realizó el diagnóstico de conocimientos previos de los estudiantes, estableció la estructura conceptual de lo que se enseñaría, usó diferentes metodologías de enseñanza, como lecturas, videos, conferencias, talleres experimentales, que unidas propician el aprendizaje significativo. Algunos de los aspectos centrales e innovadores del programa como son la enseñanza de los conceptos de electricidad a través del funcionamiento de las celdas solares y el uso de la energía solar utilizando celdas solares en proyectos escolares se presentan a continuación.

3. Enseñanza de los conceptos de corriente eléctrica, voltaje, resistencia y potencia mediante el funcionamiento de celdas solares

Inicialmente se les presentó a los estudiantes un video acerca de la energía del Sol y cómo se puede aprovechar en la Tierra, a manera de introducción al tema principal también se les dieron conferencias en las cuales se les explicaba el modelo de las bandas de energía para un material semiconductor en estado sólido y las características de los semiconductores tipo p y tipo n .

Los conceptos básicos de corriente eléctrica, resistencia eléctrica, voltaje y potencia eléctrica se enseñaron a los estudiantes mediante el funcionamiento de las celdas solares, de una forma muy básica, con apoyo en animaciones realizadas en computador y haciendo énfasis en los conceptos que se les deseaban explicar. De esta forma se les explicó que una celda solar se forma principalmente de la unión de un semiconductor tipo p y uno tipo n , en los extremos de cada semiconductor se colocan contactos eléctricos los cuales permiten la salida de las cargas eléctricas al exterior. Cuando se unen los semiconductores tipo p y tipo n hay paso de cargas eléctricas por difusión a través de la juntura debido al alto gradiente de concentración de portadores de un mismo tipo a cada lado de

la unión, es decir pasan electrones libres del semiconductor tipo n al tipo p y pasan huecos del semiconductor tipo p al n , por lo tanto en la juntura del lado n se ha formado una región de carga positiva y en el lado p se ha formado una región de carga negativa, estableciéndose una diferencia de potencial denominada barrera de potencial de la juntura y generándose un campo eléctrico dirigido de la carga positiva a la negativa, la región donde se establece el campo eléctrico es conocida como “zona de carga espacial” (ZCE). La presencia del campo eléctrico en la zona de la juntura debido a la presencia de cargas eléctricas crea a su vez una corriente de arrastre de huecos de la zona n a la p y de electrones de la zona p a la n . En equilibrio térmico la corriente total, esto es la suma de las corrientes de difusión y de arrastre de electrones y de huecos, es cero. La juntura $p - n$ se muestra en la figura 10.

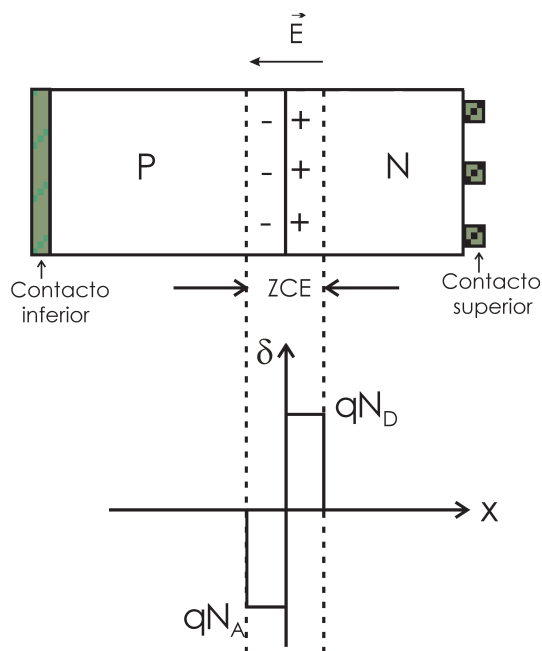


FIGURA 1. Generación del campo eléctrico en la ZCE de la juntura $p - n$. $N_{A/D}$ = concentración de impurezas aceptoras/donadoras, q = carga eléctrica, δ = densidad de carga.

Una carga eléctrica que se coloque en la zona donde se encuentra el campo eléctrico (ZCE) se movería de un punto a otro debido al

trabajo que realiza el campo sobre la carga. Ese trabajo por unidad de carga que realiza el campo se denomina voltaje:

$$V = W/q \quad (1)$$

En el diagrama de bandas de energía en la juntura de los semiconductores p y n el valor de ese voltaje es la diferencia energética en la curvatura de las bandas de los semiconductores dividida por la carga de un electrón, en la figura 2 ese valor se representa con V_{tetro} . La curvatura de las bandas se produce al hacerse continuo el nivel de Fermi en los semiconductores p y n , por el paso de los electrones del semiconductor tipo n al tipo p al formarse la juntura.

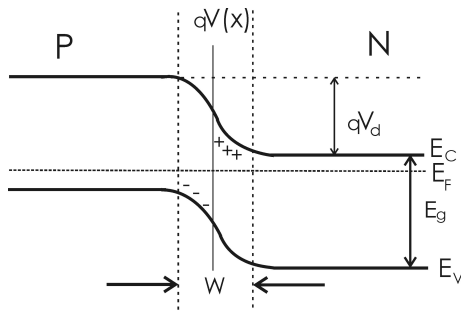


FIGURA 2. Representación del voltaje (V_d) en una juntura $p-n$. W es el ancho de la ZCE.

Cuando incide luz sobre los semiconductores que forman la juntura $p-n$ con la suficiente energía ($h\nu$) para que un electrón pase de la banda de valencia a la banda de conducción, el paso del electrón deja un estado energético libre el cual se denomina “hueco.” en la banda de valencia. Al existir una barrera de potencial en la unión $p-n$, los electrones generados en la capa p (portadores minoritarios) y los huecos generados en la capa n (también portadores minoritarios), son transportados inicialmente por mecanismos de difusión hasta la zona de carga espacial (ZCE), donde son separados por el campo eléctrico arrastrando a los portadores minoritarios a través de la juntura. Los portadores minoritarios que atraviesan la juntura se desplazan por difusión hacia los electrodos (contactos ohmicos), estos portadores se concentran en los electrodos dando lugar a un voltaje o fuerza electromotriz, y si se conecta un resistor

exterior (R_L) a los electrodos, los portadores de carga saldrán de la celda solar dando lugar a una corriente eléctrica que circulará por el resistor. En la figura 3 se esquematiza el proceso.

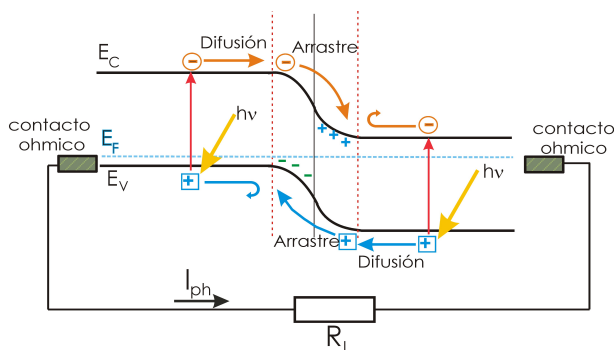


FIGURA 3. Esquema de una celda solar mostrando la generación de corriente eléctrica (I_{ph}) en ella, y la forma como se conecta un resistor eléctrico exterior R_L por el cual circula dicha corriente.

La cantidad de carga eléctrica que atraviesa el resistor R_L en un determinado tiempo t constituye la corriente eléctrica I :

$$V = dq/dt \quad (2)$$

La forma típica de conocer el funcionamiento adecuado de una celda solar es realizando medidas de corriente eléctrica en función del voltaje de polarización del dispositivo. La curva resultante de corriente en función del voltaje se denomina característica I-V de la celda y el producto IV se denomina potencia eléctrica. La figura 4 muestra las curvas de corriente en función del voltaje que se obtienen típicamente con una celda solar en oscuro (curva superior) y bajo iluminación (curva inferior), respectivamente.

La potencia máxima que genera una celda solar P_M , se obtiene en el punto de la curva I-V para el cual el área del rectángulo es mayor, este es el punto de trabajo de la celda solar ($P_M = V_M I_M$).

En el funcionamiento de la celda solar conectada a un resistor R_L , éste dificulta el paso de la corriente eléctrica por él, esto es, el material que lo compone opone una resistencia al paso de los portadores de carga. Esta resistencia (R) depende de la resistividad eléctrica (ρ) y de la geometría de la resistencia por la cual pasa la

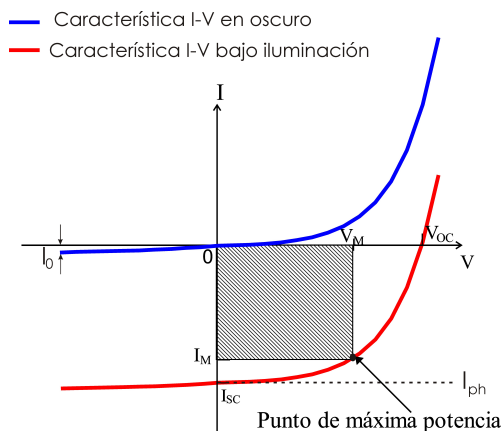


FIGURA 4. Característica I-V de una celda solar en oscuridad y bajo iluminación indicando los parámetros que la caracterizan (V_{oc} =voltaje de circuito abierto, I_{sc} =corriente de corto circuito, I_M =corriente máxima, V_M =voltaje máximo).

corriente. La resistividad a su vez depende del material del resistor y de la temperatura. La resistencia eléctrica R de un material se expresa como:

$$R = \frac{d\rho q}{A} \quad (3)$$

con L la longitud del resistor, y A el área de sección transversal del resistor a través de la cual pasa la corriente eléctrica.

Cuando los portadores de carga atraviesan el resistor RL chocan con los átomos del material del cual está hecho, aumentando su vibración y elevando la temperatura del material. De esta forma la resistencia disipa energía en forma de calor, esa energía disipada por unidad de tiempo se denomina potencia (P) y se expresa como:

$$P = I^2 R \quad (4)$$

Si se conectara por ejemplo un bombillo a la celda solar como resistor R_L , se vería que el brillo del bombillo está relacionado directamente con la corriente que genera la celda. La energía que se disipa en la resistencia es suministrada por la celda solar al transportar las cargas eléctricas a través de la juntura $p-n$ en su ZCE.

La enseñanza de los conceptos básicos de electricidad como se acaba de exponer, hace parte de las actividades planteadas en el programa de actividades pedagógicas presentado en la sección 2 anterior, y junto con las demás actividades previas y posteriores a esta, lleva a un cambio cognitivo en los estudiantes. De esta forma, el aprendizaje significativo de los conceptos básicos de electricidad (corriente eléctrica, voltaje, resistencia y potencia) explicados en esta sección mediante el funcionamiento de la celda solar se evidenciaron en la UNIDAD III “CIRCUITOS DE CORRIENTE ELÉCTRICA” del programa, en la cual se llevaron a cabo Talleres acerca de prácticas de circuitos de corriente eléctrica y realización de proyectos escolares. En estos Talleres fue indispensable el manejo de los conceptos básicos de electricidad previamente aprendidos, así como el conocimiento del dispositivo solar para construir circuitos eléctricos, observar y entender el fenómeno eléctrico, y calcular y medir variables físicas explicadas previamente. Para visualizar mejor los efectos de la variación de los parámetros físicos y las configuraciones de los circuitos se usaron bombillos como resistores. La evaluación de la Unidad III se hizo con cuestionarios durante el desarrollo de las prácticas y se pudo observar el cambio en el estado de conocimiento de los estudiantes al usar los conceptos aprendidos previamente en nuevas situaciones prácticas.

4. Elaboración de proyectos escolares

La explicación previa de conceptos y el estímulo creado en los estudiantes para utilizar los recursos renovables y no contaminantes como alternativa para generar electricidad permitió la realización, en talleres supervisados por el docente, de varios proyectos escolares entre los cuales se destacan: el automóvil solar, el alumbrado público utilizando celdas solares, el molino solar, el tractor solar, la casa de campo solar, entre otros. En la realización de los proyectos escolares se elaboraron maquetas donde se utilizaban las celdas solares como elemento generador de corriente eléctrica; las celdas solares se adquirieron comercialmente, debido a que la fabricación de una celda solar es un proceso muy complejo, que requiere de conocimientos especializados y de la infraestructura adecuada. Los estudiantes utilizaron la corriente y el voltaje de salida de

la celda solar como fuente de potencia eléctrica, y construyeron circuitos eléctricos en serie o en paralelo y los conectaron a las celdas solares para hacer funcionar los elementos que deseaban tales como resistores, motores y bombillos; en algunos casos se requirió conectar al circuito un convertidor de voltaje continuo a voltaje alterno, teniendo en cuenta que el voltaje generado por las celdas solares es continuo, también debieron tener en cuenta el punto de máxima potencia de la celda solar (mostrado en la figura 4) para asegurar el buen funcionamiento de los elementos de los circuitos conectados. El desarrollo de los proyectos contribuyó al aprendizaje significativo de los conceptos de electricidad y del funcionamiento de las celdas solares previamente estudiados, al tener que llevar a la práctica una idea que involucrara dichos conceptos. Las imágenes de algunos de los proyectos desarrollados se muestran a continuación.



FIGURA 5. *Imágenes de algunos proyectos desarrollados por los estudiantes usando celdas solares.*

5. Conclusiones

En el trabajo realizado con estudiantes de educación media se usaron las celdas solares como una alternativa pedagógica innovadora en la enseñanza de conceptos básicos de electricidad como corriente eléctrica, voltaje, resistencia y potencia; y del efecto

mediante el cual se obtiene energía eléctrica a partir de la energía solar. La celda solar por ser un dispositivo de alta tecnología se constituye en un elemento motivador y dinamizador en los procesos de enseñanza-aprendizaje.

Los estudiantes aprendieron la importancia de usar recursos renovables y no contaminantes del ambiente para la obtención de energía eléctrica; y que además de ayudar a cuidar y conservar el ambiente dichos recursos presentan ventajas económicas por su durabilidad y al evitarse procesos complejos, extracción o tendido de cableado, eliminan gastos innecesarios como los que presenta la generación de energía eléctrica de forma convencional.

Mediante las actividades pedagógicas realizadas usando recursos como videos, conferencias y lecturas, los estudiantes adquirieron los conocimientos necesarios y se motivaron para realizar proyectos escolares que utilizaban celdas solares como dispositivo generador de energía eléctrica a partir de la energía del Sol. Como resultado de este aprendizaje se promovió en los estudiantes el deseo de utilizar celdas solares y recursos renovables en su entorno habitacional y en sus proyectos de investigación futuros a nivel profesional en carreras como Física, Ingeniería, Arquitectura, entre otras.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los estudiantes del colegio Distrital La Amistad por su interés y participación en el trabajo realizado.

References

- [1] M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, and E. D. Dunlop, Progress in Photovoltaics: Research and Applications **24**, 3 (2016), pIP-15-272.
- [2] R. . G. S. Report, “Renewable energy policy network for the 21st century (ren 21)l,” (2016).
- [3] D. Ausubel, J. Novak, and H. Hanesian, *Educational Psychology: A Cognitive View* (Holt, Rinehart and Winston, 1978).

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS PARA LA ENSEÑANZA DEL MOVIMIENTO RECTILÍNEO EN EL LABORATORIO

DESIGN, CONSTRUCTION AND IMPLEMENTATION OF ACQUISITION SYSTEM AND ANALYSIS OF DATA FOR THE TEACHING OF THE UNIDIMENSIONAL MOVEMENT IN THE LABORATORY

Yeimmy Londoño¹, Jimmy A. Cortes², María E. Fernández³

¹ Docente Tiempo Completo y Docente Catedrático (Robótica Aplicada UTP, Facultad de Ingeniería, Universidad Cooperativa de Colombia y Universidad del Valle, Colombia)

² Docente Tiempo Completo (Robótica Aplicada UTP, Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia)

³ Docente Catedrático (Transiciones de Fase en Sistemas no Metálicos Universidad del Valle, Departamento de Ciencias Físicas y Tecnologías, Universidad ICESI, Colombia)

(Recibido: Mayo/2017. Aceptado: Junio/2017)

Resumen

Los equipos y prototipos disponibles en Colombia para la enseñanza de la física a nivel medio y superior, son por norma costosos, imposibles de actualizar y/o adecuar a diferentes necesidades y soportados en otros idiomas diferentes al español entre otras limitantes, razón por la cual se diseña y construye un sistema que cubra las necesidades básicas de un curso de física experimental, que en contraste con los importados sea económico, con hardware y software libre que es fácil de actualizar y/o adecuar a las necesidades puntuales de cualquier curso o profesor. A manera de ejemplo, se comparten los resultados obtenidos con estudiantes de la Universidad del Valle sede Tuluá, en la cual se hizo el experimento llamado “Teorema del trabajo y la energía mecánica”, usando el sistema descrito en este documento.

Palabras clave: Física, Mecánica, Arduino, Fotosensor, Fotocompuerta

Abstract

The equipment and prototypes available in Colombia for the teaching of physics at the intermediate and higher level, are normally expensive, impossible to update and/or adapt to different needs and supported in languages other than Spanish among other limitations. This is why a new system is designed and constructed that covers the basic needs of an experimental physics course, in contrast to the imported one, with hardware and free software easier to update and/or adapt to the specific needs of any course or teacher. As example, we show the results obtained with students of the Universidad del Valle (Tuluá), in the experiment called “Mechanical Work Theorem” which was carried out, using the system described in this document.

Keywords: Physics, Mechanics, Arduino, Photosensor, Photogate

Método e identificación del problema

instrumentos de medición de tiempo, masa, velocidad, peso, color, temperatura y demás variables que son de importancia para determinar las tendencias de los fenómenos físicos estudiados. Los altos costos de los equipos de laboratorio crean la necesidad de diseñar y construir un equipo especial para tomar la variable más utilizada de todas, el tiempo.

Durante la etapa de diseño y pensando en posibles usuarios futuros, surge la necesidad de implementar un Hardware y Software de libre acceso (Open Source), que tenga un buen nivel de reproducibilidad, evitando así problemas de altos costos en compra de Hardware y Software. Gracias a las licencias libres es posible diseñar y fabricar diferentes y significativos laboratorios y sistemas basados en el sistema Arduino Nano, que fue el seleccionado para la puesta en marcha de este prototipo.

Necesidad de la experimentación en los cursos de física

En el mundo actual y a lo largo de la historia de las ciencias, desde René Descartes (1596) e Isaac Newton (1643) a Carl Sagan (1934) y Peter Higgs (1929), pasando por todos los estudiantes y personas dedicadas o relacionadas con las ciencias naturales e ingenierías, existe la necesidad y obligación de hacer mediciones directas e indirectas de todo tipo de magnitud física, como requisito y paso fundamental impuesto por el método científico. Es por esta razón que medir el tiempo adquiere una importancia especial, ya que esta es la variable independiente por excelencia que rige a todos y a todo.

Esto permite conocer cómo evoluciona un fenómeno en función del tiempo, y así poder determinar múltiples magnitudes cinemáticas físicas del mismo, como pueden ser: Velocidad instantánea (aproximada), velocidad media, aceleración, periodos y/o frecuencias de oscilación de péndulos, contar oscilaciones entre otras.

Criterios y aspectos tenidos en cuenta para el diseño del sistema

En general los sistemas y métodos de adquisición de datos (en este caso tiempos), con los que se dispone en Colombia, son de muy buena calidad, precisión y exactitud, sin embargo, en su mayoría son desarrollados en países donde el aspecto económico no es una limitante, es decir que los usuarios de los países desarrolladores no tienen dificultades en contar con tal o cual sensor según sean sus propias necesidades; en contraste en Colombia adquirir cualquier tipo de sensor es normalmente costoso, más aún si cada día dependemos de la cotización del precio del dólar, lo cual impide que instituciones educativas de tamaño mediano y pequeño tengan la posibilidad de contar con equipos idóneos (incluso con ninguno) para la enseñanza de la física.

Otra limitante para las instituciones colombianas, son las barreras del lenguaje, ya que la literatura, contactos, soporte etc., para conocer detalles sobre estos equipos se encuentran en su mayoría en lenguajes diferentes al español, esto hace que el espectro de

posibilidades para hacer una adecuada adquisición se vea también afectada.

El aspecto técnico también es fundamental, ya que los sistemas disponibles en el mercado colombiano son de licencia cerrada, lo cual nos impide hacer cualquier modificación en el hardware o software para ajustarlo a nuestras propias necesidades, haciendo esto que muchas veces estos tipos de equipos sean subutilizados.

El ambiente académico actual demanda nuevas formas de satisfacer en los estudiantes el deseo por adquirir y/o desarrollar el conocimiento, aumentar la capacidad de análisis de situaciones, la búsqueda de soluciones, el incremento de pensamiento crítico, los aspectos anteriores se han tenido muy en cuenta para el desarrollo e implementación del prototipo desarrollado y puesto a prueba.

Fundamentos pedagógicos que justifican la necesidad de la práctica/experimentación en los procesos de enseñanza aprendizaje

El prototipo desarrollado en este trabajo será herramienta fundamental en el proceso de enseñanza aprendizaje en cursos de física mecánica de colegios y universidades de Colombia, razón por la cual pedagógicamente se tuvieron que tener presentes conceptos tales como:

- Aprendizaje significativo: El cual según el profesor de la universidad ICESI José H. González afirma que: “La capacidad para definir el área o tema de su interés; de buscar la información en diferentes fuentes, de planificar los espacios de estudio y cumplirlos; de extractar de los materiales las ideas principales y secundarias; de hacer referencia continuamente a sus propias experiencias dentro de la misma área de estudio, y con otras áreas de conocimiento y de experiencia; de atreverse a solucionar problemas ya formulados en los materiales de estudio que ha seleccionado; de atreverse a formular situaciones hipotéticas de utilización de los contenidos que está aprendiendo; de atreverse a encontrar similitudes o diferencias radicales entre el área de

conocimiento (o el tema) que está estudiando y otras áreas del conocimiento; y finalmente, de evaluar los resultados del proceso de aprendizaje...”.[1]

- Inteligencias múltiples: Donde el investigador de la universidad de Harvard Howard Gardner (1979), definió la inteligencia como: “la capacidad de resolver problemas o de crear productos que sean valiosos en uno o más ambientes culturales”. Lo sustantivo de su teoría consiste en reconocer la existencia de ocho inteligencias diferentes e independientes, que pueden interactuar y potenciarse recíprocamente. La existencia de una de ellas, sin embargo, no es predictiva de la existencia de alguna de las otras.[2]
- Aprendizaje basado en Resolución de Problemas (ABP): Según el cual un problema es “una tarea que plantea al individuo la necesidad de resolverla y ante la cual no tiene un procedimiento fácilmente accesible para hallar la solución” (Lester, 1983). Así, se debe distinguir entre un problema y un ejercicio de aplicación. Para solucionar un problema se requiere más que saber cómo realizar cálculos o aplicar procedimientos.[3]

Fundamentos Básicos del Hardware utilizado

El corazón del hardware escogido para desarrollar este prototipo fue el módulo Arduino Nano, debido a su fácil disponibilidad, bajo costo y por ser un Hardware de licencia abierta.

El módulo Arduino Nano es una pequeña y completa placa basada en un procesador ATmega328 (Figura 1). Tiene más o menos la misma funcionalidad de la Arduino Duemilanove y Arduino UNO, pero en un paquete diferente. Carece de toma de corriente continua, en cambio se comunica y alimenta con un cable USB Mini-B. El Arduino Nano fue diseñado y es producido por Gravitech.[4]

Proceso de construcción

En el proceso de diseño (Figura 2) del sistema se tuvieron en cuenta que todos los elementos usados fueran de fácil adquisición

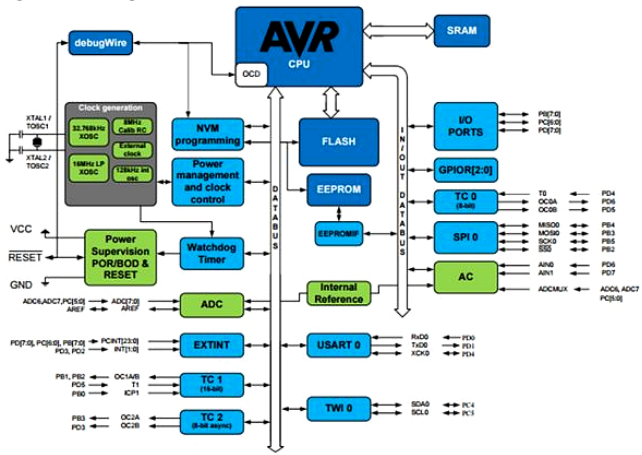


FIGURA 1. Diagrama de bloques del procesador ATmega328.

en el mercado local; que no fueran de tamaño demasiado reducido, de tal forma que cualquier usuario lo pueda reparar y/o modificar; se dispusieron los elementos en la placa de tal forma que se pueda hacer seguimiento a los procesos en el prototipo.

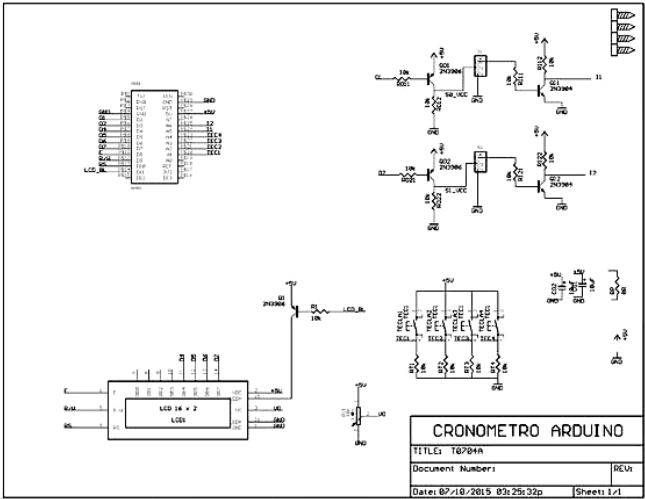


FIGURA 2. Plano del sistema con sus elementos.

El diseño, simulaciones y esquema (Figura 3) se hicieron con el software Eagle versión 5.

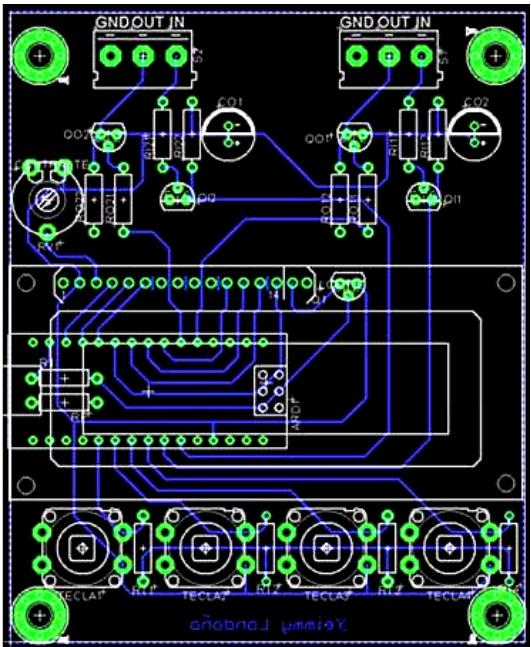


FIGURA 3. Esquema de la placa (Eagle Versión 5)

Los costos de los elementos usados para el ensamblado del sistema, son los de una tienda de electrónica común del mercado local, los materiales, cantidades y costos aparecen listados en la Tabla 1.

Nombre del elemento	Cantidad	Valor (COP)
Base de dos filas para Arduino Nano de 30 pines	1	\$1000
Base de una fila para display de 16 pines	1	\$1000
Botón normalmente abierto para teclas	4	\$4800
Cables, acrilico		\$3000
Capacitor 10 μ F a 16V	2	\$500
Display 16 $\times$ 26	1	\$10000
Fotocompuerta OPTEK 9212	1	\$9000
Hembra de montaje PCB de tres líneas	2	\$1600
Módulo Arduino NANO	1	\$40000
Placa base	1	\$80000
Resistores de 1/4W de 10k Ω	12	\$1200
Tornillos, tuercas de 1/8"	4	\$2000
Transistor 2N3904	2	\$600
Transistor 2N3906	2	\$600
Trimmer superficial 4K7	1	\$1200
TOTAL		\$155000

TABLA 1. Materiales, cantidades y costos del sistema.

Fundamentos básicos del software utilizado

En el proceso de ensamblado y configuración del sistema, fue necesario instalar el programa desarrollado en el módulo Arduino, el cual se encarga de interpretar los datos de tiempo obtenidos por el fotosensor e interpretarlos y mostrarlos como velocidad o aceleración según sea la necesidad del usuario, ya sea en el propio display del sistema o en la pantalla de un computador. De manera complementaria se creó una interface gráfica de usuario GUI que puede mostrar en la pantalla de un computador, los resultados mostrados en el display del prototipo acompañada de sus gráficos correspondientes. Los lenguajes de programación utilizados para desarrollar estos programas fueron:

- **Arduino:** El ATmega328 del Arduino Nano vienen precargado con un cargador de arranque que le permite cargar nuevo código a ella sin el uso de un programador de hardware externo. Se comunica usando el protocolo original STK500. Se puede pasar por alto el gestor de arranque y programar el microcontrolador a través de la (programación serial en circuito) ICSP encabezado utilizando Arduino ISP o similar. Para programar o editar el programa de la placa Arduino que controla el Timer-Arduino, es necesario instalar su propio lenguaje o sketch de la página www.arduino.cc del proveedor. Este software es de licencia libre.
- **Processing:** El sistema en uno de sus modos de funcionamiento, puede transmitir los datos y resultados obtenidos a un computador a través de puerto serial, se creó un programa que muestra los resultados y gráficos en la pantalla del computador, esta consola o GUI se hizo en el lenguaje de programación Processing. Este lenguaje de programación se puede descargar directamente del WebSite del proveedor en <https://processing.org/download/?processing>. Este software es de licencia libre.

Descripción general del sistema

Los botones de interacción del prototipo con el usuario se muestran en la Figura 4.



FIGURA 4. Descripción del prototipo.

- Puertos de comunicación (1 y 2): Permiten la conectividad del sistema con el medio exterior a través de diferentes tipos de sensores según este programado el sistema, en el trabajo presente está programado para que el sensor a usar sea una fotoc compuerta comercial conectada al puerto de comunicaciones 1 que mide tiempos de sombra entre la misma. El puerto de comunicaciones 2 está disponible para futuras aplicaciones y puede implementarse por software según la necesidad.
- Puerto de comunicación Mini USB: Puerto de comunicación del propio Arduino Nano que permite la transferencia de datos desde y hacia el sistema. A través de este mismo puerto el sistema se alimenta, ya sea a través del computador o una fuente/cargador estándar de celular.
- Contraste del display: Permite ajustar la luz de fondo del display según las necesidades del usuario, para que se pueda tener una lectura cómoda de los mensajes mostrados en el display.

- Tecla1 (Escape): Retrocede uno a uno entre los diferentes menú hasta llegar (si es necesario) al inicial “TOTAL FRANJAS: ...”.
- Tecla2 (Down): Cambia entre las opciones del menú escogido hacia abajo, por ejemplo; si se está en el menú “TOTAL FRANJAS...”, su valor decrecerá de uno en uno hasta llegar al mínimo que es 1.
- Tecla3 (Up): Cambia entre las opciones del menú escogido hacia arriba, por ejemplo; si se está en el menú “TOTAL FRANJAS...”, su valor aumentará de uno en uno hasta llegar al máximo que es 10.
- Tecla4 (Enter): Acepta la opción seleccionada en el menú que se encuentre activo.

Determinación de la incertidumbre en las medidas del tiempo del TIMER

Se debió de montar un sistema tal que un TIMER patrón tomara medidas de tiempo de forma simultánea y bajo las mismas condiciones que el TIMER prototipo, para esto se siguieron los siguientes pasos:

1. Se escogió el TIMER PASCO ME-9215A del laboratorio de física mecánica de la Universidad Cooperativa de Colombia sede Cali, el cual es un equipo que se encuentra calibrado y de la cual se conoce su ficha técnica, se usó este equipo como TIMER patrón para determinar un estimado de la incertidumbre del prototipo construido.
2. Se adosaron las Fotocompuertas del Timer PASCO y el Timer prototipo, asegurando que las alturas de los diodos emisores y fotoreceptores fueran las mismas, para lograr que la franja de la cual se cronometró el tiempo de paso, activaran de forma simultanea los dos Timer.
3. Se implementó un electroimán a una altura fija en un soporte universal, que sostuviera por electromagnetismo un clip que a su vez sostenía la reja de franjas oscuras, esto con el fin de

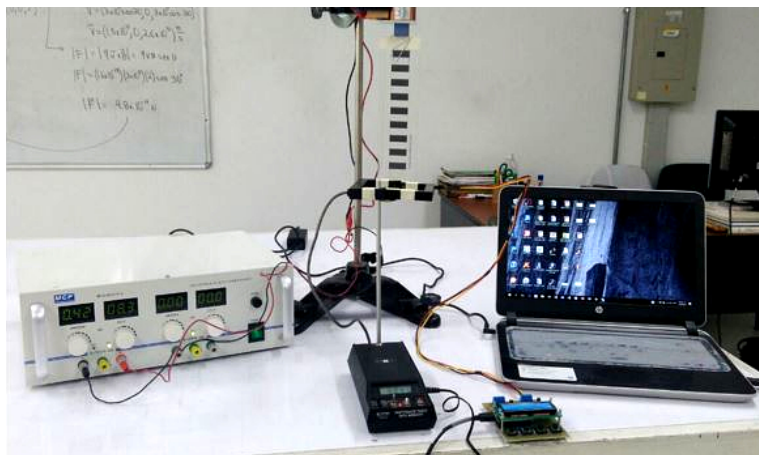


FIGURA 5. Disposición de los elementos para determinar la incertidumbre del sistema.

lograr que la reja se pudiera soltar siempre con las mismas condiciones al interrumpir el flujo de corriente a través de la fuente DC.

4. Se dispusieron todos los elementos (Figura 5) de tal forma que cada vez que se interrumpía el flujo de corriente en el electroimán, la reja caía libremente a través de las dos Fotocompuertas, ambos Timer se colocaron en modo GATE, en el cual los sistemas cronometran el tiempo de sombra a través de ellas, únicamente de la primera franja que detectan; el ancho de la franja utilizada fue de 10mm.
5. Se procedió a tomar 30 datos de tiempo de sombra en las mismas condiciones con ambos sistemas y hacer el análisis estadístico de los mismos.
6. Se tuvo en cuenta para la toma de los datos que ambos Timer presentaban un error de apreciación en los display de 1ms. Los resultados intermedios y la incertidumbre se muestran con tres decimales ($\Delta t = 1,340ms$), sin embargo, hay que tener en cuenta que el redondeo debe llevarse hasta la unidad. Otro criterio a tener en cuenta en instrumentación, es que se debe redondear por encima para asegurar que todos los valores futuros de tiempo, a medir, estén contenidos dentro

del intervalo de confianza, es decir que en conclusión la incertidumbre en las medidas de tiempo del Timer prototipo es:

$$\Delta t = 2ms$$

Descripción del sistema como instrumento independiente

El sistema se encuentra en Modo Independiente cuando no está conectado a un computador (Figura 6) para ser operativo. En este modo sólo requiere de conexión a la fuente de poder y está listo para hacer toma de datos, en futuras versiones se ha considerado que el sistema pueda funcionar mediante el uso de batería recargable semejante a un teléfono celular.

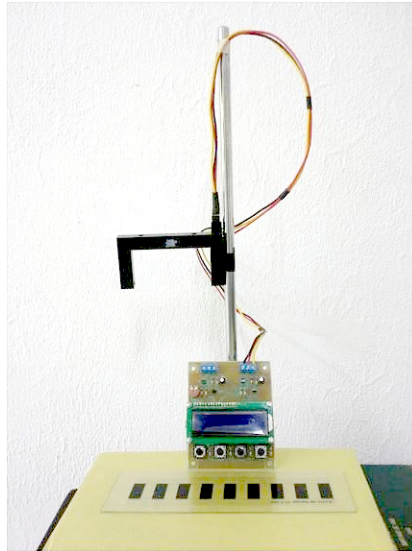


FIGURA 6. Sistema modo independiente (prototipo, fotoc puerta, reja de 9 franjas).

En este modo de operación los resultados se muestran directamente en el display, los cuales son: Velocidad media (m/s), Tiempo total (s) y/o Aceleración (m/s²).

Sistema acoplado a un computador

El sistema está en modo acoplado a un computador (Figura 7) cuando este envía los datos que aparecen en el display al computador a través de conexión serial usando el puerto estándar USB de los computadores, gracias al software (GUI) interpreta gráficamente los datos y resultados, los cuales muestran en la pantalla del computador las tendencias del MRU y del MRUA.

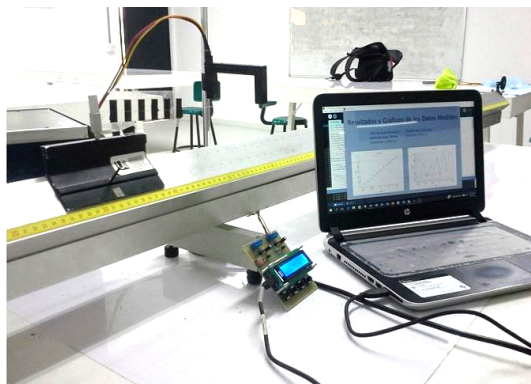


FIGURA 7. Sistema acoplado a un computador.

Ensayo del prototipo y resultados arrojados

El sistema se ha probado haciendo prácticas de laboratorio en ambientes académicos reales (Universidad del Valle sede Tuluá), en temas como Cinemática (Movimiento rectilíneo uniforme y Caída libre), y Trabajo y energía (Teorema del trabajo y la energía).

A continuación se muestra a manera de ejemplo los apartes de la guía de laboratorio usado para el experimento de Teorema del trabajo y la energía y los resultados obtenidos por uno de los grupos de trabajo:

Ejemplo - Teorema del trabajo y la energía

- Verificar experimentalmente el teorema del trabajo y la energía

- Calcular el trabajo mecánico realizado por una fuerza constante F .
- Obtener experimentalmente la energía cinética de un móvil.

Los datos medidos (teóricos) de la masa M del carro planeador, la masa suspendida m y la aceleración de la gravedad son respectivamente:

Masa del carro planeador $M = (0.19021 \pm 0.00001) \text{ Kg}$

Masa suspendida $m = (0.00387 \pm 0.00001) \text{ Kg}$

Aceleración de la gravedad $g = 9,810 \text{ m/s}^2$

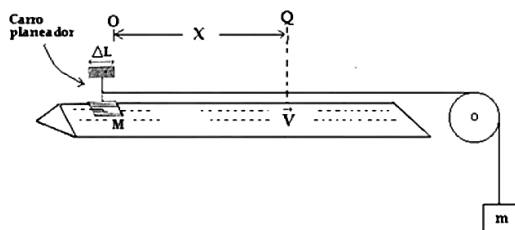


FIGURA 8. Montaje del sistema para Trabajo y Energía.

Se montaron los equipos como se muestra en la Figura 8, se tomaron los datos y se registraron en la Tabla 2, luego se calcularon las columnas de trabajo W y velocidad al cuadrado V^2 . La columna del trabajo para esta situación se calcula multiplicando cada distancia de recorrido del carro X por la fuerza constante mg , ya que se considera que las otras fuerzas que actúan sobre el sistema no aportan al trabajo neto, puesto que el peso y la normal del carro son perpendiculares al desplazamiento y que la fuerza de fricción debida al carril de aire es despreciable.[5]

Cálculos y resultados

1. Realice un gráfico del trabajo W vs V^2 (Figura 9) y con base en este gráfico calcule el valor de la masa del carro planeador M . ¿Qué se puede decir de la relación entre variables en este gráfico?

Posición de la fotocompuerta x(m)		Velocidad Timer-Arduino v(m/s)			Velocidad promedio v(m/s)	Trabajo mecánico W(J)	Velocidad promedio al cuadrado v ² (m ² /s ²)
Δx=0,001 m		Δv=0,001 m/s				ΔW=0,001 J	Δv ² =0,001 (m ² /s ²)
	x(m)	v ₁ (m/s)	v ₂ (m/s)	v ₃ (m/s)	⟨v⟩(m/s)	W(J)	v ² (m ² /s ²)
x ₁	0,100	0,196	0,204	0,204	0,201	0,004	0,041
x ₂	0,200	0,282	0,275	0,275	0,277	0,008	0,077
x ₃	0,300	0,344	0,344	0,345	0,344	0,011	0,119
x ₄	0,400	0,407	0,407	0,407	0,407	0,015	0,166
x ₅	0,500	0,458	0,478	0,478	0,471	0,019	0,222
x ₆	0,600	0,500	0,524	0,500	0,508	0,023	0,258
x ₇	0,700	0,550	0,524	0,524	0,533	0,027	0,284
x ₈	0,800	0,579	0,579	0,611	0,590	0,030	0,348
x ₉	0,900	0,611	0,579	0,579	0,590	0,034	0,348
x ₁₀	1,000	0,647	0,647	0,611	0,635	0,038	0,403

TABLA 2. Datos experimentales obtenidos por estudiantes para el experimento de “Teorema del trabajo y la energía”.

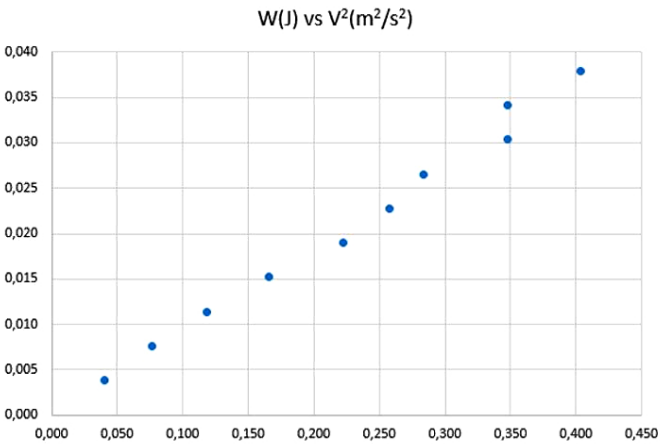


FIGURA 9. Gráfico de W vs V².

2. Compare el valor de la masa del carro M obtenida del numeral anterior con la masa real del carro M_{real} (medida directamente mediante una balanza).

Según la ecuación $W = \frac{MV_f^2}{2}$, la dependencia entre el trabajo (W) y la velocidad al cuadrado (V^2) es de tipo lineal (Figura 8) con pendiente igual a la mitad de la masa del carro

planeador y corte en el origen. Se procedió entonces a hacer el ajuste de tipo lineal con la ayuda de Excel, la ecuación ajustada es:

$$y = 0.0926x - 9 \times 10^{-5}$$

El valor del corte de esta recta con el eje del trabajo W debe de valer cero (0) en teoría, sin embargo, experimentalmente está dando un número del orden de 10^{-5} , el cual puede considerarse despreciable.

Además, se puede interpretar que la masa del carro planeador M es el doble de la pendiente que en unidades del SI es: $\langle M \rangle = 0.18525 \text{Kg}$. Usando la ecuación $\delta m = \frac{\sqrt{N}\sigma}{\sqrt{(N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2)}}$ se obtiene el error absoluto $\delta m = \Delta M = 0.00328 \text{Kg}$. A partir de los propios datos experimentales obtenidos se puede reportar completamente el valor experimental de la masa del carro planeador junto a su error asociado como:

$$M = (0.18525 \pm 0.00328) \text{Kg} \quad E\% = 1.8\%$$

Recomendaciones, sugerencias y conclusiones

- El sistema diseñado y probado cuenta con dos puertos de entrada que pueden tomar dos tipos diferentes de mediciones desde dos equipos o sensores y ampliar de esta forma el rango de aplicaciones o prácticas de laboratorio que se pueden llevar a cabo.
- El código de programación tanto del Arduino como de la GUI pueden editarse para lograr mejoras en sus líneas de código, mejorar la interfaz, cambiar o editar la forma de presentar la información y presentar otros tipos de resultados, según la necesidad y creatividad del usuario.
- Se construyó un sistema que de forma autónoma y/o conectado a un computador, mide tiempos, velocidades medias, velocidades instantáneas y aceleraciones medias para el desarrollo de prácticas de laboratorio en colegios y universidades colombianas que no cuentan con los recursos económicos suficientes que les impide comprar equipos muy costosos del exterior.

- Se documentó todo el proceso de diseño, construcción e implementación del prototipo, de tal forma que cualquier profesor o institución interesado pueda reproducirlo y/o complementarlo.
- Se puso a prueba el sistema en un ambiente académico real, obteniendo resultados con errores menores al 5 % respecto de los valores teóricos esperados.

Referencias

- [1] H. González, *El Proyecto Educativo De La Universidad ICESI y El Aprendizaje Activo* (Cali: Universidad ICESI, 2000).
- [2] F. Pérez and I. Truffello, *Revista Enfoques Educativos* **1** (1998).
- [3] “Ministerio de educación nacional. lineamientos curriculares en matemáticas.” (1998).
- [4] “Arduino Nano V3 - ATmega328 5v + Cable USB Compatible,” (2017-02-27), <https://electronilab.co/tienda/arduino-nano-v3-atmega328-5v-cable-usb/>.
- [5] P. Tipler and G. Mosca, *Física para la ciencia y la tecnología*, Física para la ciencia y la tecnología No. v. 1 (Reverté, 2005).

INSTRUCCIONES PARA LOS AUTORES

La revista MOMENTO publica semestralmente resultados originales inéditos de investigación básica y aplicada en diversas áreas de la física. El contenido de los artículos no debe haber sido publicado, total o parcialmente, en otra revista. Cada manuscrito será sometido a un proceso de evaluación por pares seleccionados por el Comité Editorial, y según su respuesta se decidirá o no su publicación o se sugerirán posibles modificaciones. El Comité Editorial podrá rechazar, sugerir cambios o llegado el caso, realizar modificaciones al estilo literario sin alterar el contenido científico. Los artículos aceptados para publicación serán revisados en su versión final por cada uno de los autores. El tiempo de evaluación es de al menos un mes. La precisión de la información en los manuscritos, incluyendo figuras, tablas y citas bibliográficas es responsabilidad completa del autor o autores.

MOMENTO publica artículos de investigación científica y tecnológica, de reflexión, de revisión y cortos. Se publican artículos en español e inglés y deben ser enviados preferiblemente en formato L^AT_EX o en Microsoft Word de acuerdo al formato momento.tex disponible en <http://revistas.unal.edu.co/index.php/momento/about/submissions#authorGuidelines>.

Los trabajos para publicar deben incluir la estructura generalmente aceptada para artículos de revistas científicas con los elementos básicos como:

- **Título del artículo.** Debe ir en español e inglés, en mayúsculas, no debe contener fórmulas ni abreviaturas. Debe ser preciso y coherente con el tema desarrollado y no debe exceder 130 caracteres incluyendo los espacios. Los títulos, resúmenes y palabras clave se organizan dependiendo del idioma en el que se escriba el artículo. Entonces, si el artículo se escribe en español se debe colocar primero el título en español y luego en inglés. Si el artículo se escribe en inglés se coloca primero el título en inglés y luego en español. Así mismo para el resumen y palabras clave.
- **Nombre de los autores.** Se debe incluir de cada autor el nombre, inicial del segundo nombre si lo tiene y el primer apellido. Relacionar la filiación de los autores con números superíndices y el correo electrónico del autor al que se le debe dirigir la correspondencia (un solo autor).
- **Resumen en español e inglés** Máximo 250 palabras. Debe contener el objetivo principal, hallazgos más importantes y conclusiones del trabajo. **Palabras Clave y Keywords.** Máximo 5 palabras. Usar tesauros específicos o disciplinares de acuerdo con el contenido del tema del manuscrito y que no se incluyan en el título del trabajo.
- **Desarrollo del artículo** El texto debe dividirse en secciones, cada una con un encabezado. Por ejemplo: Introducción, Parte Experimental y/o Desarrollo Teórico, Resultados y Discusión, Conclusiones. Los títulos se deben alinear a la izquierda y resaltarlos en negrilla. Se recomienda que estas secciones sean breves y equilibradas.
- **Referencias bibliográficas.** Sólo se deben citar aquellas referencias que figuren en la sección de bibliografía y deben ser numeradas en el texto en forma consecutiva (conforme vayan apareciendo) y en paréntesis cuadrados. No se deben citar referencias en el resumen. Las referencias bibliográficas deben seguir el formato de la American Physical Society (se recomienda el uso de BibTEX). Se deben escribir en abreviatura los títulos de las revistas o los títulos completos de no encontrarse en Journal Title

Abbreviations o en <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/nlmcatalog/journals>. En general las citas deben contener: el apellido y las iniciales del nombre de todos los autores separados por coma, seguido del nombre de la revista, el año, el volumen y las páginas. Si la publicación cuenta con DOI, se debe incluir. Para los archivos enviados en Microsoft Word poner después del año, de ser posible, las direcciones web o el link de cada referencia citada (se sugiere usar la herramienta Endnote). El material no publicado se refiere a los trabajos aceptados para publicación pero que no han sido impresos. Algunos ejemplos de citas se muestran a continuación.

- **Artículo:** P. Hohenberg and W. Kohn, Phys. Rev. 136, B864 (1964).

- **Libro:** A. Bard and L. Faulkner, Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications (Wiley, 2000). pp. 1010-1014.

- **Tesis (o similar):** K. Martínez. Producción y Caracterización de Nuevos Materiales (tesis de maestría). Bogotá, Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia; 2015. p. 10-46.

- **Memorias de congreso:** J. D. Pabón and G. Hurtado, in Memorias del Congreso Mundial de Páramos (2002) p. 98.

- **Material no publicado:** T. Poon, Optical Scanning Holography With Matlab (Springer) En prensa. 2017.

- **Página Web:** NASA. Status of the Ozone Hole 2016.

<https://ozoneaq.gsfc.nasa.gov/omps/ozone-hole/>. Consultada el 10 de noviembre de 2016.

Requisitos:

- Las figuras y tablas deberán numerarse en forma consecutiva, y deben contener en la parte inferior un título o leyenda explicativa. Las figuras deben además ser enviadas por separado con buena resolución (300 pixeles por pulgada) en formato jpg, pgn, tif o gif. Al graficar diferentes series de datos usar en lo posible diferentes símbolos (marcadores de datos en Excel, ver ejemplo en los formatos de Latex o Word). Los ejemplares físicos serán impresos en blanco y negro, sin embargo en la página web se encontrarán los artículos con las figuras a color.

- Unidades, abreviaturas y símbolos: Se usará el Sistema internacional de Unidades (m, Kg, s, K), empleando sólo términos aceptados generalmente. Es necesario explicar las abreviaturas desconocidas cuando se usen por primera vez. Se debe poner especial cuidado al escribir los símbolos para que sean identificados claramente con el autor el uso de fórmulas, caracteres especiales u otros.

- Se recomienda reducir el número de notas de pie de página, especialmente las que hacen referencia a otras notas dentro del mismo documento y no utilizarlas para hacer referencias bibliográficas.

- Si se requieren agradecimientos, reconocimientos a entidades, permisos de publicación, etc., irán al terminar el texto y antes de las Referencias bibliográficas.

- Como requisito adicional es necesario llenar los formatos “Declaración originalidad responsabilidad de autoría y conflicto de intereses” y “Formato transferencia derechos de autor” y enviarlos por correo electrónico o adjuntarlos como documentos adicionales en el sistema OJS (ver página web).

- Las contribuciones no deben superar las 15 páginas.

El texto de las contribuciones debe ser enviado por medio de la página web y/o a **momento_fcbog@unal.edu.co**

Revista Momento 55
se terminó de imprimir
y encuadernar en Proeditor
en Bogotá, D. C., Colombia.

