

# FÍSICA

REVISTA CUBANA DE FÍSICA

# FÍSICA

Sociedad Cubana de Física  
y Facultad de Física,  
Universidad de La Habana

VoL.40 No.1E  
JULIO, 2023

## XV Simposio y XIII Congreso de la Sociedad Cubana de Física



**NÚMERO ESPECIAL**



**Portada:** Foto de una parte de los participantes en el XV Simposio y XIII Congreso de la Sociedad Cubana de Física, tomada en la entrada del edificio "Varona", en la Universidad de La Habana.

**EDITOR**

E. ALTSHULER  
Facultad de Física, Universidad de La Habana,  
[ealtshuler@fisica.uh.cu](mailto:ealtshuler@fisica.uh.cu)

**EDITOR EJECUTIVO**

E. RAMÍREZ-MIQUET  
[ermiquet@gmx.com](mailto:ermiquet@gmx.com)

**EDICIÓN ELECTRÓNICA**

A. C. IGLESIAS-JAIME,  
CUJAE, La Habana  
[iglesias692@gmail.com](mailto:iglesias692@gmail.com)

**M. ESPINOSA**

Royal Melbourne Institute of Technology,  
Australia,  
[marcos.espinosa.cuertas@rmit.edu.au](mailto:marcos.espinosa.cuertas@rmit.edu.au)

**EDITORES ASOCIADOS**

O. ALMORA  
Universitat Rovira i Virgili  
[almora@uji.es](mailto:almora@uji.es)

A. J. BATISTA-LEYVA  
Instec, La Habana  
[abatista@instec.cu](mailto:abatista@instec.cu)

W. BIETENHOLTZ  
UNAM, México  
[wolbi@nucleares.unam.mx](mailto:wolbi@nucleares.unam.mx)

J. O. FOSSUM  
NTNU, Noruega  
[Jon.fossu@ntnu.no](mailto:Jon.fossu@ntnu.no)

J. -P. GALAUP  
Lab. A. Cotton (CNRS) & Univ. Paris-Sud  
[Jean-pierre.galaup@lac.u.-psud.fr](mailto:Jean-pierre.galaup@lac.u.-psud.fr)

L. H. GREENE  
National Magnetic Lab, U.S.A.  
[lhgreene@magnet.fsu.edu](mailto:lhgrene@magnet.fsu.edu)

J. LLOVERA  
CUJAE, La Habana  
[llovera@electronica.cujae.edu.cu](mailto:llovera@electronica.cujae.edu.cu)

O. de MELO  
Facultad de Física, Universidad de La Habana  
[omelo@fisica.uh.cu](mailto:omelo@fisica.uh.cu)

O. MULET  
Facultad de Física, Universidad de La Habana  
[mulet@fisica.uh.cu](mailto:mulet@fisica.uh.cu)

P. MUNÉ  
Facultad de Ciencias, Universidad de Oriente  
[mune@cnt.uo.edu.cu](mailto:mune@cnt.uo.edu.cu)

T. POESCHEL  
University Erlangen-Nuremberg  
[thorsten.poeschel@fau.de](mailto:thorsten.poeschel@fau.de)

G. ROJAS-LORENZO  
Instec, La Habana  
[german@instec.cu](mailto:german@instec.cu)

T. SHINBROT  
Rutgers University  
[shinbrot@soemail.rutgers.edu](mailto:shinbrot@soemail.rutgers.edu)

C. A. ZEN-VASCONCELOS  
Univ. Federal Rio Grande do Sul  
[cesarzen@cesarzen.com](mailto:cesarzen@cesarzen.com)

**TODOS LOS ARTÍCULOS EN FORMATO-e:**  
[www.revistacubanadefisica.org](http://www.revistacubanadefisica.org)

**COORDENADAS**

- E2 EL XV SIMPOSIO Y XIII CONGRESO DE LA SOCIEDAD CUBANA DE FÍSICA ESCAPAN A LA COVID-19**  
[THE XV SYMPOSIUM AND XIII CONGRESS OF THE CUBAN SOCIETY OF PHYSICS ESCAPE COVID-19]  
M. SÁNCHEZ COLINA

**COMUNICACIONES ORIGINALES**

- E4 MORFOLOGÍA DEL GRANO EN PIEZOCERÁMICAS  $\text{KNNLiLaTa}_{0.1}$  OBTENIDAS MEDIANTE EL PRECURSOR  $\text{NaNbO}_3$**   
[GRAIN MORPHOLOGY  $\text{KNNLiLaTa}_{0.1}$  PIEZOCERAMICS OBTAINED BY  $\text{NaNbO}_3$  PRECURSOR]  
J. F. Rebellón-Watson, R. López-Noda, J. Fuentes, J. Portelles

- E9 CUBAN GRAPHENE OXIDE (C-NANO) FOR ELECTROCHEMICAL CAPACITORS**  
[ÓXIDO DE GRAFENO CUBANO (C-NANO) PARA CAPACITORES ELECTROQUÍMICOS]  
A. Enríquez-Martínez, E. Danquillecourt-Alvares, L. A. Talavera-Carrasco, H. Mosqueda-Altamirano, Y. Mosqueda-Laffita, E. Pérez-Cappe

- E12 INFLUENCIA DE LA ACETONA EN LAS PIEZAS DE ACRILONITRILLO BUTADIENO ESTIRENO IMPRESAS EN 3D POR DEPOSICIÓN DE MATERIAL FUNDIDO**  
[INFLUENCE OF ACETONE ON ACRYLONITRILE BUTADIENE STYRENE PARTS PRINTED IN 3D BY FUSED DEPOSITION MODELING]  
O. Cruzata, S. Marrero

- E15 PROPUESTA DE UN PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN PARA LA CALIBRACIÓN DE LAS CAMPANAS GASOMÉTRICAS MODELOS LJQ-20 Y LJQ-100**  
[PROPOSAL OF A MEASUREMENT PROCEDURE FOR THE CALIBRATION OF THE BELL PROVERS MODEL LJQ-20 AND LJQ-100]  
F. J. Buzón-González, A. R. Hernández-Leonard

- E20 DISEÑO Y PRUEBAS REALIZADAS EN SENSORES PIEZOELÉCTRICOS TTFM PARA LA MEDICIÓN DE FLUJO SANGUÍNEO EN IMPLANTES CORONARIOS**  
[DESIGN AND TESTS CARRIED OUT ON TTFM PIEZOELECTRIC SENSORS FOR BLOOD FLOW MEASUREMENTS IN CORONARY IMPLANTS]  
E. Carrillo, M. Montero, A. Jiménez, J. E. Portelles-Chong, J. A. Otero

- E23 PRIMEROS PASOS EN EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CANAL DE OLAS DE BAJO COSTO**  
[FIRST STEPS IN THE DESIGN AND CONSTRUCTION OF A LOW-COST WAVE FLUME]  
J. Ávalos-Alvarado, G. Sánchez-Colina y E. Altshuler

- E25 SISTEMA DE EMISIÓN Y DETECCIÓN DE PULSOS ÓPTICOS EN EL OREN DE LOS NANOSEGUNDOS**  
[SYSTEM FOR THE GENERATION AND DETECTION OF NANOSECOND OPTICAL PULSES]  
S. Raymond, J. del Villar, S. Stolik, D. Jiménez, A. Valor y J. M. de la Rosa

- E28 DESARROLLO DE UN SISTEMA FOTOACÚSTICO PARA LA DETERMINACIÓN DE COEFICIENTES DE ABSORCIÓN ÓPTICOS**  
[DEVELOPMENT OF A PHOTOACUSTIC SYSTEM FOR THE DETERMINATION OF OPTICAL ABSORPTION COEFFICIENTS]  
R. Díaz Fuentes, S. Stolik, A. Valor y J. M. de la Rosa

- E32 OBTENCIÓN DE PARÁMETROS ÓPTICOS DE LA PIEL A PARTIR DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE REFLECTANCIA DIFUSA RESUELTA ESPACIALMENTE**  
[DETERMINATION OF OPTICAL PARAMETERS OF SKIN BASED ON SPATIALLY RESOLVED DIFFUSE REFLECTANCE MEASUREMENTS]  
J. E. Azcuy, A. R. Valor, S. Stolik y J. M. de la Rosa

- E35 UNA ASIMETRÍA RARAMENTE ANALIZADA EN LAS ECUACIONES DE MAXWELL**  
[AN ASYMMETRY RARELY ANALYZED IN MAXWELL'S EQUATIONS]  
J. J. Llovera, C. Osaba

- E38 EL PBL Y SU INSUFICIENTE APARATO CONCEPTUAL. USO EN CURSOS DE FÍSICA**  
[THE PLB AND ITS INSUFFICIENT CONCEPTUAL APPARATUS. USE IN PHYSICS COURSES]  
A. Alejo, J. J. Llovera S

**E41 SIMULACIONES DE LOS EXPERIMENTOS DEL TUBO DE LEYBOLD Y DEL ESTUDIO DE LA RADIACIÓN**

**TÉRMICA**

[SIMULATIONS OF LEYBOLD TUBE EXPERIMENTS AND THE STUDY OF THERMAL RADIATION]

J. Ortega Breto

**E45 PROPUESTA DIDÁCTICA PARA LA PROFESIONALIZACIÓN DE LA FÍSICA GENERAL EN LA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

[DIDACTIC PROPOAL FOR THE PROFESSIONALIZATION OF GENERAL PHYSICS IN THE CIVIL ENGINEERING MAJOR]

S. L. González Bello, S. Campos Movilla

**E48 PROBLEMAS INTEGRADORES Y CONTEXTUALIZADOS COMO VÍA PARA LA COMPRENSIÓN DE LOS PRINCIPIOS Y LEYES FÍSICAS**

[INTEGRATING AND CONTEXTUALIZED PROBLEMAS AS A WAY TO UNDERSTAND THE PRINCIPLES AND LAWS OF PHYSICS]

J. J. Figueredo, C. Morales

**E51 PERCEPCIÓN DE LA CIENCIA Y CULTURA CIENTÍFICA: LA FÍSICA INCLUIDA**

[SCIENCE PERCEPTION AND SCIENTIFIC CULTURE: PHYSICS INCLUDED]

D. de Alamino, Y. Aguilar

**E54 PRÁCTICA DE LABORATORIO DE FÍSICA EN LA CARRERA DE TÉCNICO SUPERIOR DE BIOFÍSICA MÉDICA**

[PHYSICS LABORATORY PRACTICE FOR MEDICAL BIOPHYSICS SENIOR TECHNICIANS]

A. Torres, E. Espinoza, J. Mondéjar

# EL XV SIMPOSIO Y XIII CONGRESO DE LA SOCIEDAD CUBANA DE FÍSICA ESCAPAN A LA COVID-19

## THE XV SIMPOSIUM AND XIII CONGRESS OF THE CUBAN PHYSICAL SOCIETY ESCAPE COVID-19

M. SÁNCHEZ COLINA

Presidente, Sociedad Cubana de Física

Entre las últimas actividades académicas que se pudieron realizar en Cuba debido a las restricciones impuestas por la pandemia de la COVID-19, estuvo el XV Simposio de la Sociedad Cubana de Física (SCF) y su XIII congreso, celebrados del 9 al 13 de marzo de 2020 en el edificio Varona de la Universidad de la Habana. El evento, que se realiza cada tres años, reunió a una buena parte de los profesionales que trabajan en el campo de la física en Cuba. En el simposio se dictaron 13 conferencias plenarias que cubrieron variadas áreas, como física de superficies, ciencia de materiales, física de altas energías y enseñanza de la física. Las conferencias fueron impartidas por reconocidos especialistas cubanos y de otros países: Canadá, Estados Unidos de América, Francia, Holanda, Italia, México y Uruguay. En esta ocasión, contamos con 174 participantes, de ellos 165 cubanos. A lo largo de 4 días, se presentaron 217 trabajos, 52 en forma oral y 165 en forma de carteles. El programa incluyó un panel de discusión dedicado al papel de la sección de jóvenes estudiantes de maestría y doctorado de la SCF.

El simposio se desarrolló en un entorno agradable, y propició discusiones e intercambios fructíferos que contribuyeron al éxito de la conferencia.

Fueron muchas las personas que contribuyeron al desarrollo exitoso del evento, pero queremos en especial agradecer al equipo de la Facultad de Física de la Universidad de la Habana (UH) integrado por Carlos G. Raña, Julio Vidal, Bárbara Pérez, Gretel Quintero, Jesús Alba, Joeluis Cerutti y Nelia López, sobre quienes recayó el mayor peso del trabajo. También queremos agradecer a las instituciones auspiciadoras nacionales: el Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (InSTEC), el Instituto de Matemática, Cibernética y Física (ICIMAF) y el Centro de inmunología Molecular (CIM) así como a organismos foráneos como IOP Publishing, el Centro Latinoamericano de Física (CLAF) y la Federación Iberoamericana de Sociedades de Física (FEIASOFI).

En el Congreso -efectuado el viernes 13 de marzo- se presentó un resumen de las actividades realizadas en el periodo 2017-2020, entre las que destaca una intensa labor para estrechar relaciones con asociaciones afines. Así, en 2018 ingresamos a la Sociedad Americana de Vacío (AVS) y en 2019 a la Unión Internacional para la Ciencia, Técnica y Aplicaciones del Vacío (IUVSTA). También en 2019 nos integramos a la Asociación Internacional de Estudiantes de Física (ICPS), hecho que sirvió para reactivar la sección de

jóvenes de la SCF.

Se fortalecieron las relaciones con la American Physical Society (APS) y con las Sociedades Mexicana y Brasileña de Física. La APS continúa brindándonos libre acceso a sus revistas, y financió la participación de varios estudiantes de doctorado cubanos en la Canadian-American-Mexican Graduate Students Physics Conference (CAM), que es un evento auspiciado por las asociaciones de física de estos tres países. Al CAM 2017 realizado en Washington, D.C. asistieron 14 estudiantes de doctorado de las Universidades de la Habana, las Villas, Oriente y Camagüey, y centros como el IMRE, el CIM, InSTEC e ICIMAF. En la edición del CAM 2019 en Sudbury, Ontario, Canadá, participaron 4 estudiantes cubanos, dos de la Facultad de Física de la UH y uno de la Universidad de Las Villas, mientras que un estudiante del ICIMAF presentó su trabajo por teleconferencia y el Dr. Eduardo Martínez Montes de Centro de Neurociencias de Cuba (CNEURO) impartió una charla plenaria.

Un hecho significativo de este periodo es que en 2018 la SCF cumplió 40 años, lo que fue celebrado de conjunto con la realización en la Habana de la VII reunión de la Federación Iberoamericana de Sociedades de Física (FeIASOFI). A la celebración asistieron los presidentes de las Asociaciones de Física de Argentina, Brasil, Colombia, Chile, El Salvador, España, Honduras, México y Uruguay y en la misma fueron reconocidas organizaciones e individuos, nacionales y extranjeros, que han contribuido de manera relevante al desarrollo de la física en Cuba.



Figura 1. Momentos de la conferencia magistral de Jesús Rubayo Soneira (InSTEC, Universidad de la Habana), tras haberle sido conferido el Premio nacional de Física "Manuel F. Gran" (Foto: E. Altshuler).

Una actividad distintiva de la SCF en los últimos años ha sido la Olimpiada Latinoamericana Universitaria de Física (OLUF). La OLUF es una competencia de conocimientos en la que pueden participar estudiantes de cualquier Universidad de América Latina y el Caribe. Se organiza anualmente desde 2017 y ha tenido gran impacto y acogida en la región. En la edición de 2019 participaron 208 estudiantes de 34 universidades de Argentina, Brasil, Colombia, Costa Rica, Cuba, El Salvador, Guatemala y México. La actividad ha contado con el auspicio del Centro latinoamericano de Física (CLAF), la UNESCO, la Academia de Ciencias de Cuba, FeIASOFI, y el ICTP South American Institute for Fundamental Research de Brasil.

La edición de la Revista Cuban de Física (RCF) es otra de las actividades esenciales de la SCF. La revista se encuentra en el Emerging Source Citation Index y su número de citas va en aumento. En 2018 su versión digital fue certificada por el ministerio de ciencia tecnología y medio ambiente (CITMA).

Durante el congreso se entregó el Premio nacional de Física "Manuel F. Gran" al Dr. Jesús Rubayo Soneira, profesor del InSTEC (Universidad de La Habana) por su valioso aporte y dedicación a la enseñanza de la Física y sus relevantes resultados de investigación. También se premiaron los mejores trabajos presentados por los jóvenes. En esta ocasión el primer lugar fue compartido, y se entregó a los maestros en Ciencia, Juan José González Armesto y Yerila Rodríguez Martínez y un segundo lugar se entregó a la Lic. Bárbara Pérez Fernández, todos de la Facultad de Física de la UH.

En el congreso se desarrolló un amplio debate sobre la situación actual de la Física en Cuba, los aspectos fundamentales que afectan su desarrollo y las vías en que la SCF podría ayudar a mejorarlos. El problema más debatido fue el de la calidad de la enseñanza de la física en los diferentes niveles de educación. El asunto es complejo y abarca múltiples factores, como la emigración de profesionales y la falta de estimulación adecuada a los profesores, problemas que venimos arrastrando a partir de la crisis económica iniciada en los años 90.

Especial atención mereció la situación del cambio climático global, tema sobre el que se acordó que es necesario jugar un papel más activo, tanto en la divulgación de la problemática como en hacer un llamado a las autoridades sobre la necesidad de disminuir el consumo de los combustibles fósiles a partir de su uso más eficiente y una introducción acelerada de las diferentes fuentes renovables de energía en el país. El acuerdo

fue publicado en la sección de noticias del número 90 de la Revista Energía y Tú disponible en el sitio: [www.cubasolar.cu](http://www.cubasolar.cu)

Por último, se realizaron las elecciones del buró ejecutivo de la SCF para el periodo 2020-2023 que quedó integrado por: la Dra. María Sánchez como presidente, el Dr. Ernesto Altshuler como vicepresidente primero (ambos de la Universidad de la Habana) y los doctores Alexey Cruz (Universidad de Oriente), Elizabeth Rodríguez (ICIMAF), Arbelio Pentón (Universidad de la Habana), Rolando Cárdenas (Universidad central de las Villas) y Kalet León (CIM) como vicepresidentes. El nuevo ejecutivo expresó su compromiso para continuar trabajando en aras de desarrollo de la física en Cuba.

Durante el congreso fueron ratificados o elegidos los siguientes jefes de secciones de la sociedad:

- Dra. Karina Garcia, Biofísica y Física Médica
- Dr. Juan José Llovera, Enseñanza de la Física
- Dr. Rolando Cárdenas, Física de la Tierra y el Espacio
- Dr. Roberto Mulet, Física Teórica
- Dr. German Rojas Lorenzo, Física Nuclear, Atómica y Molecular
- M.Sc. Lorenzo Hernández, Instrumentación y Metrología
- M.Sc. Joeluis Cerutti, Físicos Jóvenes (estudiantes de posgrado)

No se reunieron las secciones de Materia Condensada, Protección radiológica y la de Óptica y espectroscopía, por lo que queda pendiente su reorganización y elección de sus directivos.

También se creó la nueva sección de Mujeres en la Física, encabezada por la Dra. Aurora Pérez.

Es un placer compartir este número especial de la RCF con una selección de los trabajos presentados en el XV Simposio de la SCF. La edición de esta publicación se ha convertido en un medio de comunicación relevante a escala nacional para los físicos cubanos, contribuyendo a difundir el conocimiento generado mediante la investigación y facilitando el intercambio de información entre los distintos grupos a nivel nacional. El próximo simposio tendrá lugar en 2023 y esperamos que sea tan estimulante como este, como lo indican las contribuciones presentadas en este volumen.

# MORFOLOGÍA DEL GRANO EN PIEZOCERAMICAS $KNNLiLaTa_{0.1}$ OBTENIDAS MEDIANTE EL PRECURSOR $NaNbO_3$

## GRAIN MORPHOLOGY IN $KNNLiLaTa_{0.1}$ PIEZOCERAMICS OBTAINED BY $NaNbO_3$ PRECURSOR

J.F. REBELLÓN-WATSON<sup>a†</sup>, R. LÓPEZ-NODA<sup>a</sup>, J. FUENTES<sup>b</sup>, J. PORTELLES<sup>a,b</sup>

a) Instituto de Cibernética, Matemática y Física, La Habana, Cuba; julia@icimaf.cu

b) Facultad de Física, Universidad de la Habana, La Habana, Cuba

† autor para la correspondencia

Recibido 9/03/2020; Aceptado 10/07/2020

PACS: Sodium Niobate (Niobato de sodio), 77.84.-s; Topochemical Reaction (Reacción topoquímica), 61.05.cp; XRD, EDS, SEM, 68.37.Hk

En la actualidad, la mayor parte de las producciones de dispositivos industriales que contienen materiales piezoeléctricos utilizan el compuesto titanato zirconato de plomo (PZT) por sus altos valores de permitividad dieléctrica y eficiencia electromecánica. Sin embargo, por sus altos contenidos de plomo, varios convenios europeos sobre la protección de la salud y del medio ambiente, incluyen al PZT en la lista de sustancias nocivas que no deben emplearse en dispositivos electrónicos.

En el año 2004, Saito y colaboradores obtuvieron una piezocerámica libre de plomo tipo  $K_xNa_{1-x}NbO_3$  (KNN), dopada con litio, tantalio y antimonio, con propiedades dieléctricas y piezoeléctricas comparables a las del PZT [1]. Dicho estudio plantea que las propiedades del KNN mejoran si se parte de la utilización del precursor neobato de sodio ( $NaNbO_3$ ). Este se obtiene a partir de una reacción topoquímica entre el  $Bi_{2.5}Na_{3.5}Nb_5O_{18}$  ( $BiNN5$ ) y el  $Na_2CO_3$ .

Este método presenta como resultado en el precursor obtenido, granos con una morfología en forma de placas delgadas y una estructura tipo  $BiNN5$ , donde los cationes  $Na^{+1}$  sustituyen a los de  $Bi^{+1}$  conservando su estructura original, como se observa en la Fig. 1.

Basándose en el método utilizado por Saito y colaboradores, se han realizado estudios acerca del comportamiento dieléctrico del KNN, variando el tipo de dopante y las concentraciones de los mismos [2–4].

En este trabajo se realiza el estudio de DRX (Difracción de Rayos X) y de SEM (Microscopía Electrónica de Barrido) para la morfología del precursor  $NaNbO_3$  y del sistema KNN dopado. También se establece la correlación que existe entre las propiedades microestructurales de este precursor con las propiedades del  $KNNLiLaTa_{0.1}$ . En la Fig. 2 se muestra la estructura cristalina teórica de este sistema realizadas en el software Vesta [5].

El sistema  $NaNbO_3$  se obtuvo por el método de sales fundidas [6], a partir de una reacción topoquímica entre  $BiNN5$  y  $Na_2CO_3$  a  $950^\circ C$ , usando  $NaCl$  como fundente. Posteriormente, se realizaron reiteradas lavadas a la muestra

$NaNbO_3$  para eliminar el bismuto en el sistema.

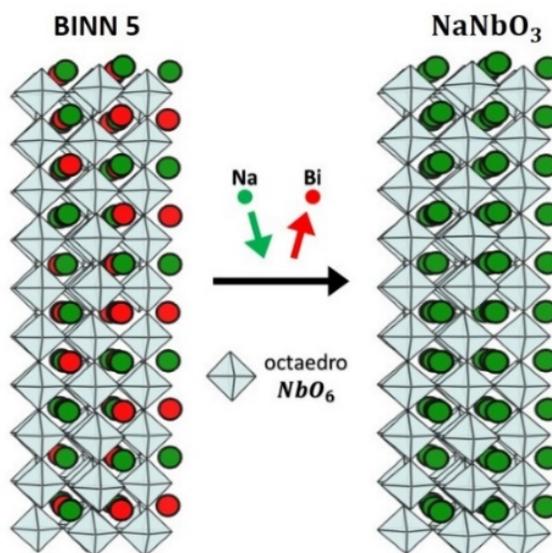


Figura 1. Esquema de la reacción topoquímica entre el  $BiNN5$  y el  $Na_2CO_3$  formándose  $NaNbO_3$ . Las figuras fueron realizadas en el software Vesta [5].

El sistema  $KNNLiLaTa_{0.1}$  fue sinterizado a partir del precursor  $NaNbO_3$  obtenido y los siguientes carbonatos y óxidos:  $K_2CO_3$ ,  $La_2O_3$ ,  $Li_2O_3$  y  $Ta_2O_5$ . Los polvos fueron calcinados a  $800^\circ C$  y sinterizados durante dos horas a  $1200^\circ C$  en una atmósfera controlada a través de crisoles sellados.

La difracción de Rayos X (DRX) de ambas muestras, se realizó en un difractómetro de polvos Philips X'pert en configuración de Bragg-Brentano, con radiación de  $Cu-K\alpha_1$  y  $Cu-K\alpha_2$ . Las mediciones se realizaron a temperatura ambiente, en un intervalo angular entre  $10^\circ$  y  $90^\circ$  con paso  $0.02^\circ C$ , a 30 kV y 16 mA.

La Espectrometría de Energía Dispersada (EDS, por sus siglas en inglés) y Microscopía Electrónica de Barrido (SEM, por sus siglas en inglés) se realizaron en un microscopio JEOL JSM 5300 a temperatura ambiente.

Se determinó el factor de tolerancia de los compuestos  $BiNN5$ ,  $NaNbO_3$ , y  $KNNLiLaTa_{0.1}$  para determinar la estabilidad en la

estructura cristalina de los sistemas anteriores mencionados [7]. Los valores obtenidos fueron de 0.83, 0.79 y 0.81 respectivamente. Esto implica que las perovskitas tienen estructuras estables, por lo que la sustitución de cationes  $Bi^{+1}$  por  $Na^{+1}$  en reacción topoquímica puede llevarse a cabo, así como el sistema KNN dopado con litio, lantano y tantalio.

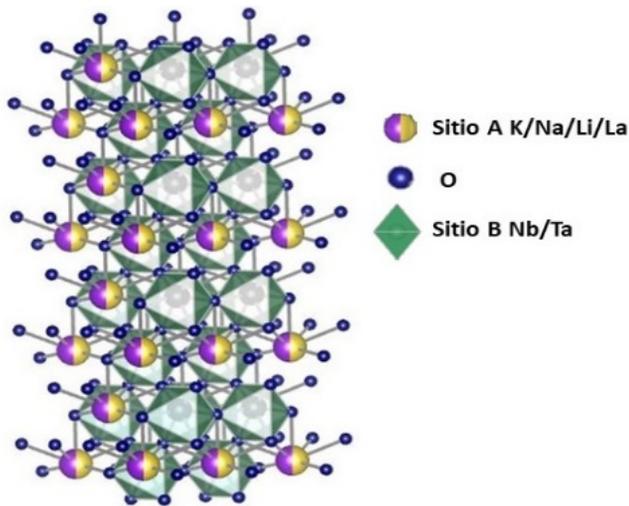


Figura 2. Representación de la estructura cristalina del  $KNNLiLaTa_{0.1}$ . La figura fue realizada en el software Vesta [5].

En la Fig. 3 se muestran los patrones de difracción de rayos X del compuesto obtenido por reacción topoquímica, en diferentes etapas del proceso de lavado. En la Fig. 3a se muestra el sistema antes de ser lavado, observándose la fase  $NaNbO_3$  (marcada con asterisco) y una segunda fase espuria de  $Bi$  metálico (marcada con círculo). En la Fig. 3b se observa el patrón asociado a una etapa intermedia del proceso de lavado, apreciándose una disminución de la intensidad de los picos asociados a la fase de  $Bi$ , lo que sugiere una disminución en su concentración, manteniéndose la presencia de  $NaNbO_3$ . En la Fig. 3c se observa el estadio final del sistema, después de sucesivas lavadas, donde se aprecian solo reflexiones asociadas a la fase  $NaNbO_3$ . Los procesos de múltiples lavadas aseguran la eliminación de la fase de  $Bi$  metálico no deseada en el precursor.

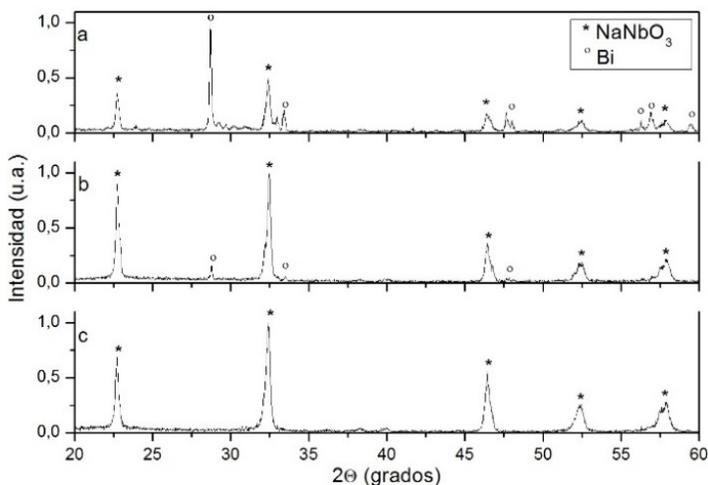


Figura 3. Patrones de difracción de rayos X del sistema: a) antes de las lavadas, b) etapa intermedia y c) después de las lavadas.

En la Fig. 4 se muestra el patrón de difracción asociado al sistema  $NaNbO_3$ , después el proceso de lavado. Se utilizó el método de Rietveld implementado en el programa FullProf [8], para el refinamiento de la estructura. Se implementó una función tipo Voigt en aproximación de Thompson-Cox-Hasting para ajustar los perfiles de los picos asociados a las reflexiones de Bragg.

El indexado del patrón se realizó a partir de una fase  $NaNbO_3$  con grupo espacial P221 y parámetros de celda  $a = 5.506 \text{ \AA}$ ,  $b = 5.563 \text{ \AA}$  y  $c = 15.582 \text{ \AA}$ , consistente con la reportada por otros autores [3], y no se identificaron picos adicionales relativos a fases espurias. Los parámetros de bondad de ajuste asociados al proceso de refinamiento muestran una buena concordancia entre los patrones experimental y teórico (%Rp, %Rwp, %Re y  $\chi^2$  de 49.6, 49.1, 28.8, 2.909 respectivamente).

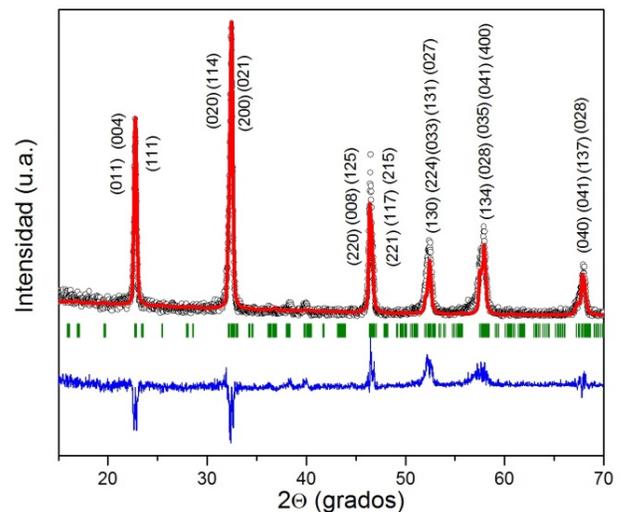


Figura 4. Patrón de difracción correspondiente al sistema  $NaNbO_3$ .

En la Fig. 5 se muestra el patrón de difracción asociado al  $KNNLiLaTa_{0.1}$ . También se utilizó el método de Rietveld implementado en el programa FullProf [8], para el refinamiento de la estructura.

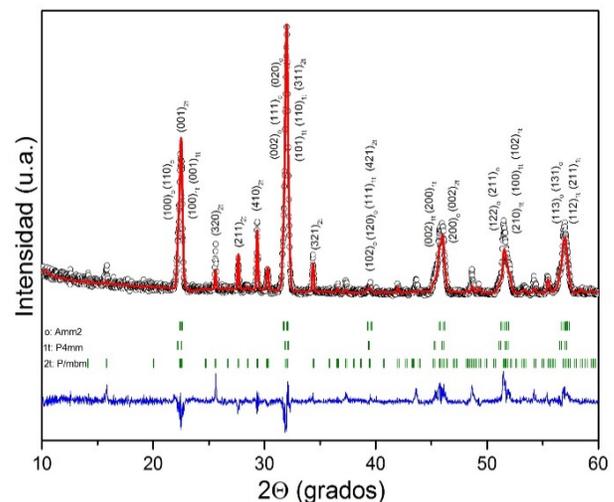


Figura 5. Patrón de difracción correspondiente al sistema  $KNNLiLaTa_{0.1}$ .

En la Fig. 6 se muestran los espectros de EDS del sistema antes y después del proceso de lavado. En la Fig. 6a (antes de las lavadas) se aprecian líneas de emisión correspondiente a elementos de la fase  $\text{NaNbO}_3$  y a fases adicionales de bismuto, corroborando los resultados obtenidos por DRX mostrados en la Fig. 3a. En la Fig. 6b (después del proceso de lavado), solo se observan las líneas de emisión asociadas al compuesto  $\text{NaNbO}_3$ . Esto sugiere que las fases espurias de  $\text{Bi}$  fueron removidas del compuesto en el proceso de reiteradas lavadas, lo que concuerda con los resultados obtenidos por DRX mostrados en la Fig. 3c. Estos resultados corroboran que las múltiples lavadas aseguran la eliminación de las fases espurias de  $\text{Bi}$  no deseada en el precursor.

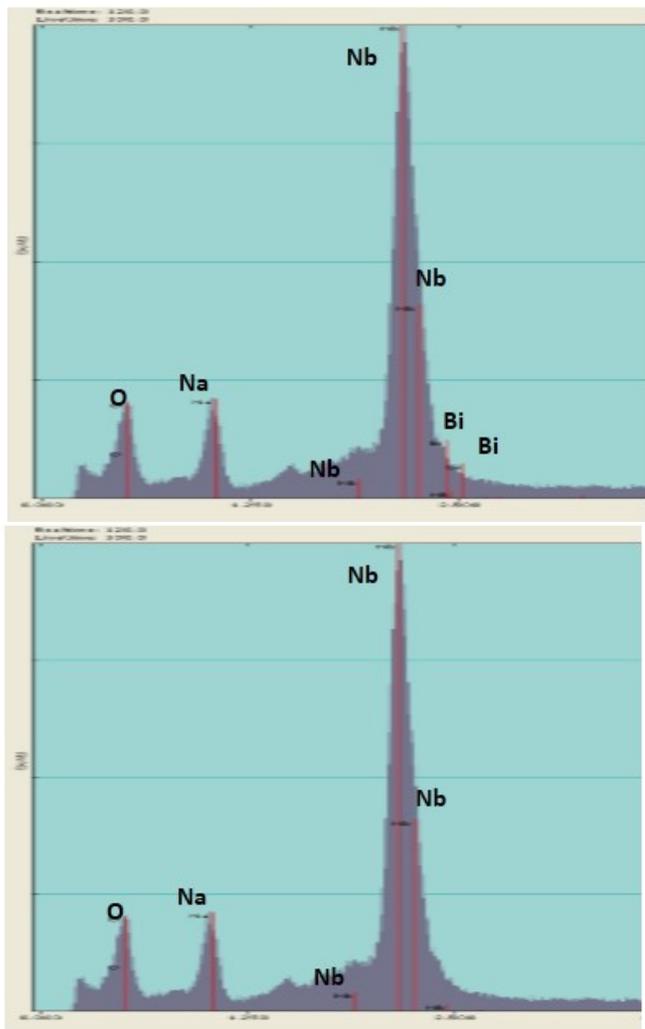


Figura 6. Espectro de EDS del sistema  $\text{NaNbO}_3$  a) antes de las lavadas, b) después del proceso de lavado.

En la Fig. 7 se presentan las imágenes de SEM tomadas en diferentes puntos de la muestra fracturada de  $\text{NaNbO}_3$ . El sistema presenta una morfología de granos en forma de placas de pequeño espesor, sin una forma geométrica predeterminada. Este resultado concuerda con lo reportado en diferentes estudios [1,3,6].

En la Fig. 8 se observa una imagen de SEM de fractura de la muestra  $\text{KNNLiLaTa}_{0.1}$ . El sistema presenta una morfología en forma de poliedros volumétrico y se observan dos tamaños de

granos promedios.

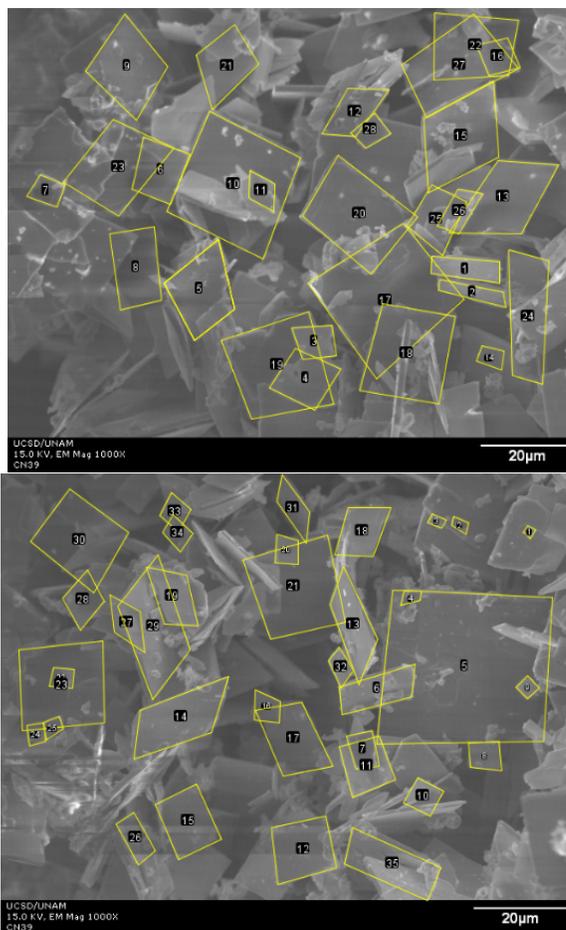


Figura 7. Imágenes de microscopía del sistema  $\text{NaNbO}_3$ .

Se utilizó el software de procesamiento de imagen ImageJ [10] para determinar el tamaño promedio de grano en cada una de las estructuras.

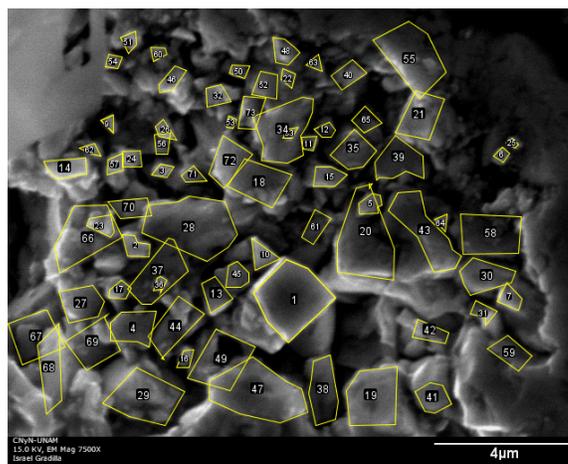


Figura 8. Imágenes de microscopía del sistema  $\text{KNNLiLaTa}_{0.1}$ .

En el caso del  $\text{NaNbO}_3$  se tomó una forma de grano rectangular como equivalente a la morfología promedio de estos. Se determinó el perímetro y el área de diferentes granos, como

se observa en la Fig. 7, y se calculó la menor y mayor longitud respectivamente.

En la Fig. 9 se observan los histogramas realizados a partir de las longitudes calculadas para cada grano del  $\text{NaNbO}_3$ . Se obtuvo una longitud promedio de  $a = 6.46(2) \mu\text{m}$  para la menor dirección y  $b = 12.29(6) \mu\text{m}$  para la mayor dirección.

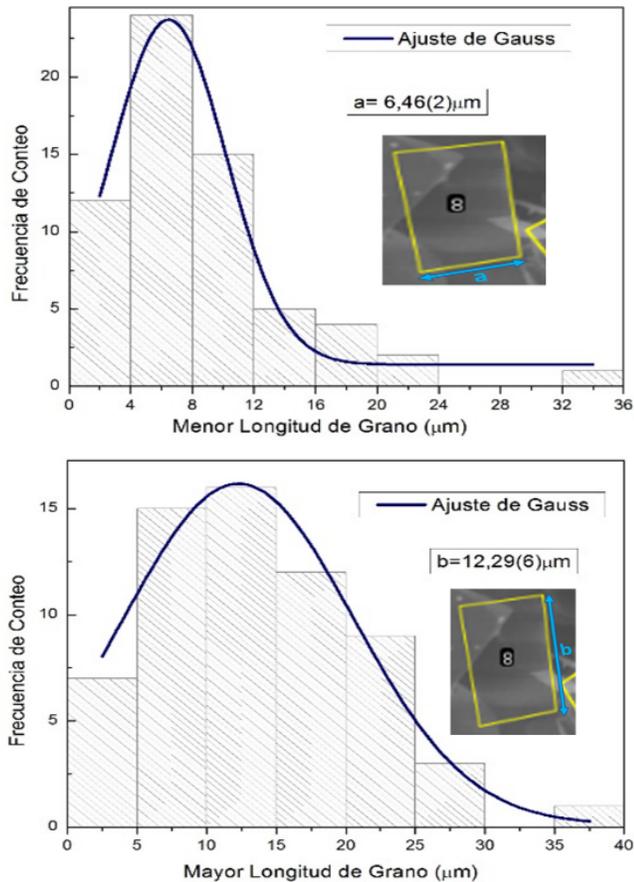


Figura 9. Histogramas asociados a las mediciones de longitud de granos del sistema  $\text{NaNbO}_3$ , a partir de las micrografías de la Fig. 7.

En el SEM del  $\text{KNNLiLaTa}_{0.1}$  se midieron las áreas de una de las caras de los granos. A partir de estos valores, se calculó el radio del círculo equivalente. Con estos datos, se realizó el histograma de la Fig. 10.

Se obtuvo una distribución bimodal de tamaños de granos [11]. Los valores promedio de los radios fueron  $r_1 = 0.27(2) \mu\text{m}$  y  $r_2 = 0.69 \mu\text{m}$ .

Se obtuvo un  $\text{NaNbO}_3$  con características similares a otros reportados a partir de este método utilizado [1–4, 6]. Sin embargo, en la literatura consultada vemos que los sistemas KNN sin dopar tienen una morfología de granos en formas de cubos muchos más grandes [12]. Esto sugiere que los dopantes utilizados inhiben el crecimiento del grano. En correspondencia con el hecho de que el  $\text{La}^{3+}$  evita el crecimiento del grano [2, 4]. Además, por la distribución bimodal que se obtuvo a partir del SEM y el patrón de difracción del  $\text{KNNLiLaTa}_{0.1}$ , se puede sugerir que cada tamaño promedio de grano está asociado a una fase.

A través del método de las sales fundentes, y de una

reacción topoquímica, se obtuvo el  $\text{NaNbO}_3$ . Los estudios por DRX y EDS mostraron que, mediante sucesivas lavadas, se logró eliminar la fase no deseada de *Bi*. El  $\text{NaNbO}_3$  fue descrito con una fase ortorrómbica. El  $\text{KNNLiLaTa}_{0.1}$  presenta una coexistencia de tres fases, ortorrómbica  $\text{Amm}2$  (55.33%), una tetragonal  $\text{P4mm}$  (22.66%) y otra tetragonal  $\text{P4/mbm}$  (22.01%) debido a una estructura del tipo bronce tungsteno que se forma durante la reacción. A través de SEM, en el caso del  $\text{NaNbO}_3$ , se observó una morfología de granos en forma de placas rectangulares de pequeño espesor. Mientras que en el  $\text{KNNLiLaTa}_{0.1}$ , la morfología es de granos poliédricos con unas dimensiones mucho menor que las de su precursor y presenta una distribución bimodal debido a la presencia de algunos dopantes como el *La*.

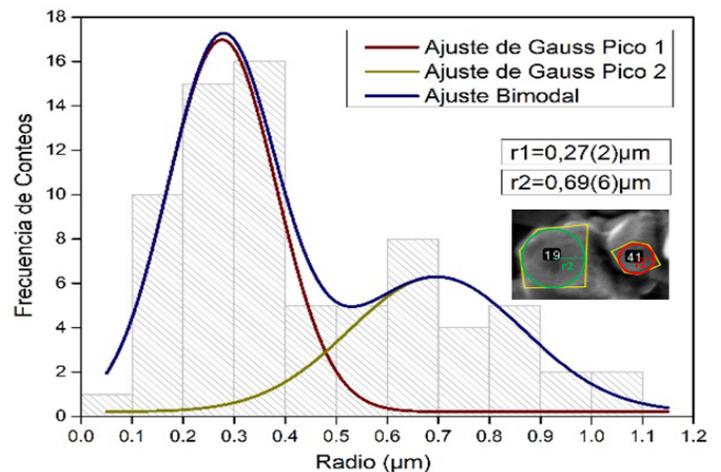


Figura 10. Histograma asociado a las mediciones de los radios de los granos del sistema  $\text{KNNLiLaTa}_{0.1}$ , a partir de la micrografía de la Fig. 8.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Y. Saito, *Nature* **432**, 84 (2004).
- [2] J. Portelles, N. Palmero, J. Fuentes, R. López-Noda, O. Raymond Herrera, M. P. Cruz, y J. M. Siqueiros, *J. Appl. Phys.* **122**, 234102 (2017).
- [3] J. Portelles, J. Fuentes, J. Gervacio, C. Ostos, O. Raymond, J. Heiras, M. P. Cruz y J. M. Siqueiros, *Ferroelectrics* **534**(1), 175 (2018).
- [4] J. Fuentes, J. Portelles, A. Pérez, M.D. Durruthy-Rodríguez, C. Ostos, O. Raymond, J. Heiras, M.P. Cruz y J.M. Siqueiros, *Appl. Phys. A* **107**, 733 (2012).
- [5] Vesta v 3.4.0 (2017).
- [6] L. Li, J. Deng, J. Chen y X. Xing, *Chem. Sci.* (2015).
- [7] V.M. Goldschmidt, *J. Naturwissenschaften* **14**, 477 (1926).
- [8] J. Rodríguez-Carvajal, "FULLPROF: A Program for Rietveld Refinement and Pattern Matching Analysis", Abstracts of the Satellite Meeting on Power Diffraction of the XV Congress International Union of Crystallography, Toulouse (1990).
- [9] D. Lin, K. W. Kwok, H. L. W. Chan, *Appl. Phys. A* **91**, 167 (2008).
- [10] ImageJ v 1.8.0-112 (2012).

[11] D. Chakrabarti, M. Strangwood, y C. Davis, The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International (2009).

[12] Fu Lei, Lin Li, Luo Yun-rong, Zhang Ying-qian, Xie Wen-ling, Chen Yu, Mater. Res. Bull. **94**, 506 (2017).

---

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0, <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) license.



# CUBAN GRAPHENE OXIDE (C-NANO) FOR ELECTROCHEMICAL CAPACITORS

## ÓXIDO DE GRAFENO CUBANO (C-NANO) PARA CAPACITORES ELECTROQUÍMICOS

A. ENRÍQUEZ-MARTÍNEZ<sup>a</sup>, E. DANQUILLECOURT-ALVAR<sup>b</sup>, Y. MOSQUEDA-LAFFITA<sup>a†</sup>, EDUARDO PÉREZ-CAPPE<sup>a,c</sup>, AND L. A. TAVERA CARRASCO<sup>c</sup> AND HUGO MOSQUEDA ALTAMIRANO<sup>d</sup>

a) Institute of Materials Science and Technology (IMRE)-Havana University, Havana, Cuba; yodalgis@imre.uh.cu<sup>†</sup>

b) Instituto Superior Minero Metalúrgico (ISMM); Holguín, Cuba.

c) IPN, Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, México.

d) Universidad Autónoma de Nuevo León; Nuevo León, México.

<sup>†</sup> corresponding author

Recibido 9/03/2020; Aceptado 6/05/2020

PACS: Disordered solids (sólidos desordenados), 78.40.P; carbon (carbón), 81.05.Uw; transport properties (propiedades de transporte), 74.25.F; electrodes (electrodos), 82.45.Fk; electrochemical capacitors (capacitores electromecánicos), 82.47.Uv.

In current years, Electrochemical Capacitors (EC) have attracted a major attention, essentially due to their long life-cycle, high power density, and linking role between traditional dielectric capacitors and batteries/fuel cells in vehicle application [1]. EC is a charge-storage device that contains two electrodes and an electrolyte as the most important components. Among the more suitable electrode material for EC are the carbon-based nanomaterials [1–3] because of its high electrical conductivity, electrochemical stability, rectangular shape of cyclic voltammetry curves and symmetrical galvanostatic charge-discharge profile. The Ionic Conducting Group of IMRE-UH recently reported [2, 3] a first graphene oxide (C-Nano) synthesized from national precursors. It was demonstrated that this disordered carbon combines a large specific surface area ( $467 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ ) and high electronic conductivity (approx 0.1-1 S/cm from 173 to 293 K, respectively) [2]. In addition, the surface of C-Nano contains 14.2% wt of doping heteroatoms like O, N, S, H [2, 3] which is much desired for carbon-based materials used as EC. However, this carbon synthesized from Cuban precursors (C-Nano) has not yet been studied as an EC electrode. Herein, we report the electrical and electrochemical properties of C-Nano-based electrodes prepared to work in an EC.

The electrodes were prepared dispersing C-Nano powders in a polyvinyl alcohol (PVA) polymeric alcoholic suspension (Merck), stirring until a rubber-like paste is formed, and after rolling up to a film is obtained. The electrical characterization of this C-Nano film was carried out in a automatized homemade probe, coupled to a Keithley 2636B source-measure unit, by using the Hall [3] and Seebeck effects [3] (for determination of sign, concentration and mobility of charge carriers) and the Van Der Paw technique [3] (for determination of the electronic conductivity). The experiment were carry out in a wide temperature range from 175 to 300 K, controlled by a Lakeshore 336 that guarantees  $\pm 0.001$  K, under vacuum condition ( $10^4$  Pa). In order to put the contacts on the sample silver paint was used. The transport

charge activation energy was determined from an Arrhenius plotting ( $\ln$  conductivity vs  $1/T$ ). For the electrochemical measurements the as-prepared C-Nano film was cut in disc-shaped films, weighted and then pressed in stainless steel 304 wire meshes (current collector) at 10 MPa for 1 min. The tests were carried out by Cyclic Voltammetry (CV) and Galvanostatic charge-discharge, in a Biologic VMP3 electrochemical workstation, in the fully voltage window – 0.45 V and 1.25 V vs Ag/AgCl, using  $\text{H}_2\text{SO}_4$  aqueous dissolutions (0.5 M) as electrolyte.

In Fig. 1 are shown the dependencies of the logarithm of the conductivity ( $\ln\sigma$ ), concentration ( $n$ ) and mobility ( $\mu$ ) of the positive charge carriers with temperature in the range 175 to 300 K. The transport charge activation energy ( $E_a = 22 \text{ meV}$ ), charge sign (positive) and charge carriers concentration ( $10^{19}$ - $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ) registered for C-Nano film (C-Nano with binder) in whole studied temperature range are similar to those reported [2] for pristine C-Nano powder (without binder), which indicates the preservation of the pristine C-Nano electric nature (p-type semiconductor) during electrode preparation.

However, the charge mobility and the electronic conductivity diminished one and three orders of magnitude, respectively [2]. This fact can be explained considering the presence of binder (insulating nature) in a proportion with respect to the conductive carbon that hinders the percolation of carriers in the prepared C-Nano electrode. This low value of electronic conductivity is still enough for Electrochemical Capacitors applications [4–9], but could be improved preparing the electrode with a lower binder composition than that used in this work.

The electrochemistry tests between -0.34 and 1 V (not shown) did not show any redox irreversible peaks indicating that the C-Nano-based electrode is stable in a wide voltage window (1.34 V). The CV curves at different scan rates between 0 and 0.85 V (Fig. 2) have a semi-rectangular shape with very little

deformation for all scan rates, typical for faradic redox process in disordered carbon [4–9]. The voltammograms seem to be sloped 45 grades for scan rates values higher than 70 mV/s indicating an appreciable increment of the material resistance [4–9].

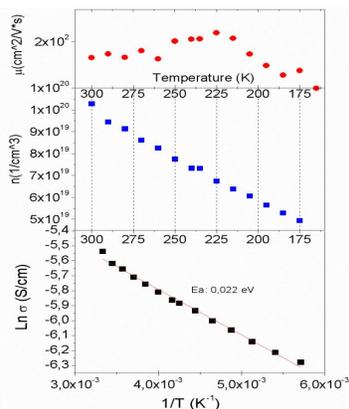


Figure 1. Electric properties vs temperature of C-Nano electrode.

The specific capacitance ( $C$ , F/g), energy density ( $E$ , Ah/Kg), and the maximum instantaneous density Power ( $P_{max}$ , kAh/Kg) that C-Nano electrode is able to deliver at low and high speed conditions are shown in the Table 1. These values are among the best reports for carbon-based symmetrical electrochemical capacitor [1,3–6].

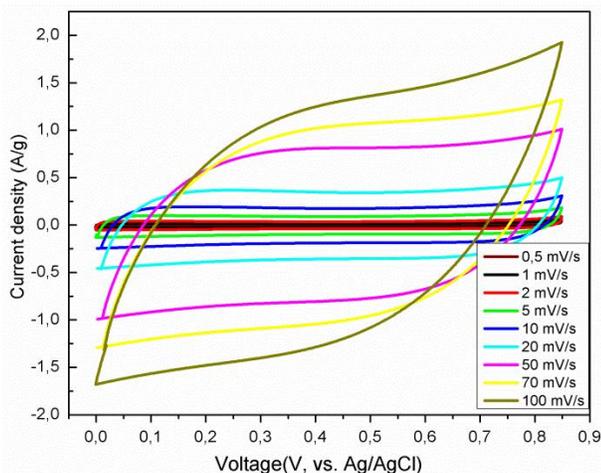


Figure 2. Electric properties vs temperature of C-Nano electrode.

In addition, the charge/discharge process, showed from  $P_{max}$  vs time delivered by the C-Nano EC (Fig.3), at very low (10 mA/g) and high (1500 mA/g) current density display a triangular shape confirming the capacitive behavior of the C-Nano-based electrode [1,4–9]. The not constant slope and deformation observed at low current density is associated to the diffusion of electrolytes ions into small pores of electrode and redox reactions that typically have much slower kinetics than double layer charging predominating at very higher current.

This behavior is explicated from the compositional and textural properties of the Cuban C-Nano graphene oxide [2,3] since this material has heteroatoms on its surface [2,3] that selectively react with the electrolytes ions as in FEC at low scan rates [2,3] providing a good capacitance, while also presents

an adequate morphology and porosity [2,3], which allows an acceptable power density at high scan rates as in EDLC [2,3].

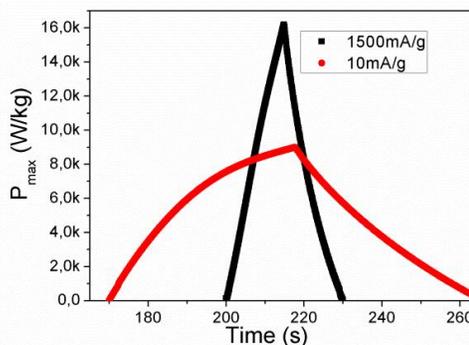


Figure 3. Galvanostatic charge-discharge curves of C-Nano-based electrode in positive window.

In summary, C-Nano can be prepared as an electrode material for hybrid electrochemical capacitors. The electrode preserves the electronic transport behaviour observed in the pure C-Nano, except that the conductivity and mobility of the positive charges carriers decreases as a consequence of the binder influence. The prepared electrode presents a wide electrochemical window and displays acceptable specific capacitance, energy and power densities values, in the positive voltage window, when works in acid electrolyte. This behaviour could be improved by working in the percolation threshold of the C-Nano/binder composite during the electrode preparation.

Table 1. The specify capacitance ( $C$ ), energy density ( $E$ ), and Power (kAh/Kg) that C-Nano electrode is able to deliver in low and high rate speed conditions in the 0-0.85 V window.

Scan rates (mV/s)	$C$ (F/g)	$E$ (Ah/kg)	$P$ (kAh/kg)	Current density (mA/g)
0.5	332	119	9	10
70	184	66	16	1500

## BIBLIOGRAPHY

- [1] Poonama, K. Sharmab, A. Arora, S.K. Tripathi, Journal of Energy Storage **21**, 801 (2019).
- [2] E.Danguillecourt, Y.Mosqueda, L.Montoro, N.Mohallem, H.Cabrera and E.Pérez, J. Solid State Electrochem. **246**, 404 (2017).
- [3] E.Danquillecourt, “Nuevos materiales carbonosos para baterías de iones litio y condensadores electroquímicos”. Tesis de doctorado, Universidad de La Habana, 2019.
- [4] A.Muzaffar, M.B.Ahamed, K.Deshmukh, J.Thirumalai, Renewable Sustainable Energy Rev. **101**, 123 (2019).
- [5] A. González, E. Goikolea, J. A. Barren, R. Mysyk, Renewable Sustainable Energy Rev. **58**, 1189 (2016).
- [6] A. Borenstein, O. Hanna, R. Attias, S. Luski, T. Brousse and D. Aurbach, J. Mater. Chem. A. **5**, 12653 (2017).
- [7] F. Beguin, V.Presser, A. Balducci, E. Frackowiak, Adv. Mater. **26**, 2219 (2014).
- [8] A. Kurniawan, L. Ong, F Kurniawan, C. Lin, F. Soetaredjo, S. Zhao and S. Ismadji, RSC Adv. **4**, 34739 (2014).
- [9] J. Wang, H. Xian, T. Peng, H. Sun and F. Zheng, RSC Adv. **5**, 13607 (2015).

---

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0, <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) license.



# INFLUENCIA DE LA ACETONA EN LAS PIEZAS DE ACRILONITRILLO BUTADIENO ESTIRENO IMPRESAS EN 3D POR DEPOSICIÓN DE MATERIAL FUNDIDO

## INFLUENCE OF ACETONE ON ACRYLONITRILE BUTADIENE STYRENE PARTS PRINTED IN 3D BY FUSED DEPOSITION MODELING

O. CRUZATA<sup>a†</sup> Y S. MARRERO<sup>a</sup>

a) Laboratorio de Tecnología Láser, Instituto de Ciencias y Tecnología de Materiales IMRE, Universidad de la Habana, Cuba. osmel@imre.uh.cu<sup>†</sup>

b) Facultad de Ingeniería Mecánica, Departamento de Mecánica Aplicada, Universidad Tecnológica de La Habana CUJAE, Cuba.

† autor para la correspondencia

Recibido 9/03/2020; Aceptado 28/04/2020

PACS: Polishing in surface treatments (Pulido en tratamientos superficiales), 81.65.B; Polymer flow properties (Propiedades del flujo de polímero), 47.57.Ng; Mechanical properties, deformation and flow (Propiedades mecánicas, deformación y flujo), 83.50.-v

La exposición a vapores de acetona es uno de los métodos utilizados para mejorar la superficie exterior de las piezas de Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) producidas por impresión 3D mediante la tecnología de Modelación por Deposición Fundida (FDM) [1]. Su uso se fundamenta por el modo en que ocurre la disolución entre compuestos con la misma polaridad, siendo la acetona y el ABS de naturaleza polar. En las superficies de las piezas se produce un reacomodamiento del material en estado semilíquido que cubre las irregularidades, disminuyendo la rugosidad exterior de las piezas.

El procedimiento ha sido reportado [2, 3] y replicado, pero la mayoría de las veces se realiza en instalaciones donde se aumenta la temperatura para acelerar el proceso. Sin embargo, es conocido que estos vapores son explosivos en presencia de calor y que la repetitividad del resultado depende más de la experiencia intuitiva que de una metodología.

Los estudios sobre las variaciones de dimensiones y de formas en las piezas que se someten a dicho procedimiento a temperatura ambiente son escasos, por lo que no se conoce con antelación en qué magnitud pueden ser afectadas las piezas sobre todo en aquellas que tienen una función de rigor en un equipo o mecanismo.

Para obtener los datos necesarios que permitieran realizar una valoración de ese comportamiento, fueron construidas ocho piezas de tres geometrías diferentes (un bloque escalonado con superficies horizontales y verticales, un cilindro truncando por un plano inclinado a 45 grados, y un casquete semiesférico). La construcción se realizó empleando una impresora GeeeTechPrusa I3 con los parámetros de trabajo mostrados en la Tabla 1 y un filamento de ABS de 1.75 mm de diámetro.

De cada geometría se conservó una pieza como patrón. Las restantes se expusieron a los vapores de acetona 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 8 horas respectivamente. Todas las pruebas se realizaron a temperatura ambiente y en una cámara herméticamente

cerrada que contenía en su parte inferior 80 ml de acetona líquida con un 99.5 por ciento de pureza, y en su parte superior las piezas a tratar.

Tabla 1. Parámetros de trabajo Impresora GeeeTechPrusa I3.

Diámetro del extrusor	0.4 mm
Altura de las capas	0,4 mm
Resolución	0,2 mm
Velocidad del cabezal	20 mm/s
Temperatura cabezal	220 °C.
Temperatura base	110 °C.

Culminado el tiempo de exposición, las muestras se colocaron en una campana de extracción de gases durante doce horas antes del análisis dimensional para evitar que la manipulación produjese nuevas deformaciones en las piezas.

La Tabla 2 muestra los valores de rugosidad medidos utilizando un rugosímetro marca Mitutoyo modelo SJ-210, ver Fig. 1.



Figura 1. Instalación para la medición de la rugosidad.

En correspondencia con lo reportado en las publicaciones consultadas, se evidencia una gran disminución a medida que aumentaba el tiempo de exposición.

Los radios y el redondeo de los bordes aumentaron, verificándose una diferencia de 3.36, 0.82 y 2.48 mm para los casquetes semiesféricos, los cilindros truncados y los bloques escalonados respectivamente. Las alturas sufrieron disminución en los casquetes (2.01 mm) y en los cilindros (0.69 mm). Además se comprobó que en los bloques escalonados las alturas de los escalones intermedios aumentaron entre 0.50mm y 0.78mm debido a que reciben el material que se desliza desde los escalones superiores.

Tabla 2. Rugosidad media ( $\mu\text{m}$ ).

Superficies	Inicial	Final
Horizontales	18,17	2,03
Verticales	28,44	1,34
Inclinadas	38.35	0.41
Cilíndricas	20.25	0,46

La dureza superficial, medida utilizando un durómetro SHORE tipo D y empleando la metodología descrita en la Norma Cubana “Plásticos y Ebonita. Determinación de la dureza de penetración mediante un durómetro” (Dureza SHORE) (ISO 868:1985, IDT) [4], tuvo dos tendencias diferentes: la primera, en planos verticales y horizontales donde ocurrió una disminución atribuible a la reducción del espesor de la capa al perderse material; la segunda, en planos inclinados y superficies cilíndricas, donde la dureza aumentó debido a que el polímero que se deslizó cubrió los escalones de la capa existente aumentando su grosor, ver Fig. 2.

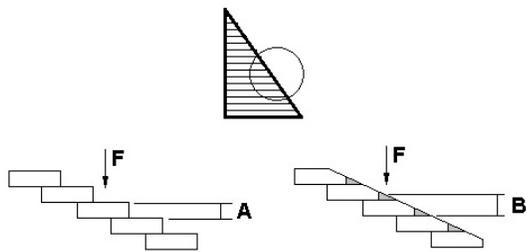


Figura 2. Redistribución del polímero en planos inclinados.

Las variaciones encontradas confirmaron que al usar este método para mejorar la calidad superficial, debe existir otro parámetro de control más riguroso que la valoración de la apariencia exterior, pues las deformaciones en las piezas pueden llegar a ser mayores que la tolerancia admisible de fabricación.

Tomando como referencia los modos de control utilizados en los procesos de fabricación de piezas por fundición o moldeo, se procedió a tabular las mediciones realizadas. Ver Tabla 3.

De esta forma se compararon los datos obtenidos con lo establecido en las normas: “Tolerancia para dimensiones lineales, excepto aristas matadas (ISO 2768)” y “Tolerancia para dimensiones lineales de aristas matadas (radios exteriores y alturas de chaflán ISO 2768)” [5], que se muestra en la Tabla 4.

La comparación permitió conocer que de las clases de tolerancia, descritas en las normas como: fina (f), media (m),

grosera (c) y muy grosera (v), se pasaba de clase media a clase grosera en las piezas analizadas cuando los tiempos de exposición eran superiores a seis horas.

Tabla 3.

Horas	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Diferencia (mm)		
		A (30)	B (20)	C (10)
1	8,15	0,38	0,01	0,37
2	7,58	0,48	0,02	0,33
3	6,81	0,44	0,01	0,34
4	6,79	0,58	0,12	0,28
5	6,44	0,84	0,08	0,27
6	2,83	1,14	0,64	0,52

Ese resultado implica que si el objetivo es obtener una pieza donde predominan superficies verticales y horizontales con una desviación no mayor de  $\pm 0.2$  mm de su medida nominal, el máximo valor de rugosidad superficial que se puede alcanzar con este método es  $Ra = 6.44 \mu\text{m}$ , lo que corresponde a cinco horas de exposición a vapores de acetona a temperatura ambiente.

Tabla 4.

Clase de Tolerancia	Descripción	Desviaciones admisibles respecto al valor nominal $d$ (en mm)		
		$0.5 < d \leq 3$	$3 < d \leq 6$	$6 < d \leq 30$
f	fina	$\pm 0,05$	$\pm 0,05$	$\pm 0,1$
m	media	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$
c	grosera	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	$\pm 0,5$
v	muy grosera	-	$\pm 0,5$	$\pm 1$

Si fuera indispensable una pieza con mejor acabado superficial y los mismos valores de tolerancia dimensional sería recomendable utilizar algún otro método para el alisado.

De esta forma quedó marcada una frontera entre la funcionalidad de la pieza y el valor de rugosidad superficial a alcanzar.

Además, registrar las dimensiones inicial y final de las piezas expuestas sirvió para conocer cuáles son las sobre medidas que deben ser agregadas desde el proceso de diseño. Esto permitirá compensar la migración del material en una misma superficie o por el desplazamiento desde una superficie hacia otra contigua.

Para comprobar la influencia de la exposición a vapores de acetona en los radios de las piezas de ABS fabricadas mediante impresión 3D, se realizó un análisis similar al descrito para las dimensiones lineales.

En este caso la frontera entre la clase de tolerancia media y la grosera, se ubicó en el límite de las cuatro horas de exposición.

En todos los bordes se encontró una tendencia al aumento del redondeo, siendo más pronunciada en los bordes exteriores.

La experiencia realizada reafirma la influencia de la acetona como método para el alisado de piezas de ABS mediante su exposición a los vapores a temperatura ambiente. Además, establece los límites en que dicho método puede ser

aplicado para piezas de responsabilidad técnica sin afectar su funcionalidad.

El comportamiento en piezas de formas más complejas o en aquellas que posean estructuras internas diseñadas como soportes o conductos, debe ser abordado para tener una valoración integral de las posibilidades de aplicación del método.

#### BIBLIOGRAFÍA

[1] N. S. Bakar, M.R. Alkahari, H. Boejang, *Journal of Zhejiang University - Science A: Applied Physics & Engineering*, (2010).

[2] S. Jaspreet, S. Rupinder y S. Hardwinder, *IJAMR*, 29 (2017).

[3] A. Lalepour, C. Janeteas y A. Barari, *The International Journal of Advanced Manufacturing*, (2004) pp 1505-1520 (<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.12.159>)

[4] Oficina Nacional de Normalización, *Plástico y ebonita. Determinación de la dureza de penetración mediante un durómetro (dureza shore)*, La Habana, (2000), NC ISO 868:2000.

[5] International Standard Office, *General tolerances - Part 1: Tolerances for linear and angular dimensions without individual tolerance indications*. ISO, (1989), ISO 2768-1:1989.

---

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0, <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) license.



# PROPUESTA DE UN PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN PARA LA CALIBRACIÓN DE LAS CAMPANAS GASOMÉTRICAS MODELOS LJQ-20 Y LJQ-100

## PROPOSAL OF A MEASUREMENT PROCEDURE FOR THE CALIBRATION OF BELL PROVERS MODELS LJQ-20 AND LJQ-100

F. J. BUZÓN-GONZÁLEZ<sup>a†</sup>, A. R. HERNÁNDEZ-LEONARD<sup>b</sup>

a) Laboratorio de Volumen, Instituto Nacional de Investigaciones en Metrología, Cuba; franb@inimet.cu<sup>†</sup>.

b) Subdirección de Ciencia e Innovación Tecnológica, Instituto Nacional de Investigaciones en Metrología, Cuba; alehl@inimet.cu.

† autor para la correspondencia

Recibido 9/03/2020; Aceptado 25/05/2020

PACS: Metrology (Metrología), 06.20.-f; Flows in pipes and nozzles (Flujo en tuberías y toberas), 47.27.nf; Spatial dimensions (Dimensiones espaciales), 06.30.Bp; Natural gas (Gas natural), 88.85.mf.

Las campanas gasométricas son patrones de calibración de laboratorio para la unidad de volumen de gas y flujo volumétrico [1].

Las dos campanas gasométricas modelos LJQ-20 y LJQ-100 que se encuentran en Cuba han sido previamente verificadas en China por el Instituto de Metrología de Zhejiang por el método de encintado con una incertidumbre expandida de 0.4 %.

En Cuba las campanas gasométricas LJQ-20 y LJQ-100 (fabricante Hangzhou TNMA MEasure Technology Co., Ltd.) se utilizan para la verificación de contadores de gas, mediante la comparación del volumen de aire medido por las campanas gasométricas y el registrado con el contador en base a la norma cubana NC-1006:2014 [2].

El logro en Cuba de la calibración de estas campanas gasométricas significaría la sustitución de la importación de este servicio.

### I. DESARROLLO

La ISO 4006:1991 [3] define la campana gasométrica como:

Dispositivo de medición volumétrico, utilizado para gases, constituido por un tanque estacionario y un tanque móvil coaxial. El volumen de gas de la cavidad que se encuentra por encima del líquido de sellaje puede ser deducida de la posición del tanque móvil. (Fig. 1)

Para su calibración es necesario determinar su volumen de referencia. Esto se realiza por medio de diferentes métodos de calibración (Fig. 2).

*Máquina de medición por coordenadas, rastreador laser o brazo con sensores de distancia:* Se emplean los instrumentos mencionados para determinar el diámetro interior de la campana gasométrica. Basándose en estas mediciones se halla el volumen de referencia [4,5].

*Encintado (Strapping):* Las dimensiones de la campana, el tanque y los niveles del líquido de sellaje son medidos calculándose la capacidad. Como una cinta métrica es pasada alrededor del perímetro de la campana, el procedimiento se le conoce como encintado [6,7].

*Embotellado (Bottling):* Consiste en transferir un pie cúbico (1 ft<sup>3</sup> equivale aproximadamente a 28.32 dm<sup>3</sup>) de aire entre una botella de pie cúbico o un patrón de pie cúbico portátil y la campana gasométrica [7].

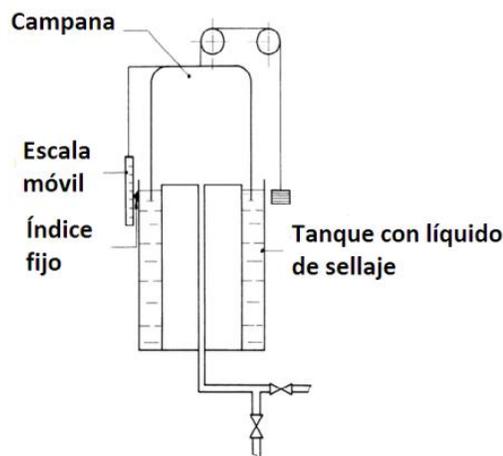


Figura 1. Campana gasométrica.

*Desplazamiento:* El volumen de la campana gasométrica se determina utilizando un recipiente de referencia. Durante la calibración, el recipiente lleno de aceite es conectado a la salida de la campana gasométrica. Vaciar el recipiente causa que el aire fluya y la campana se desplace una longitud que corresponde al volumen de referencia [1].

*Pesaje:* Se interconecta un recipiente cerrado a una campana gasométrica. El volumen del aceite que fluye del recipiente es reemplazado por una cantidad igual de aire. El aceite que fluye es pesado y como su densidad es conocida, su volumen

es obtenido a partir del pesaje, determinándose así el volumen de referencia de la campana gasométrica [8].

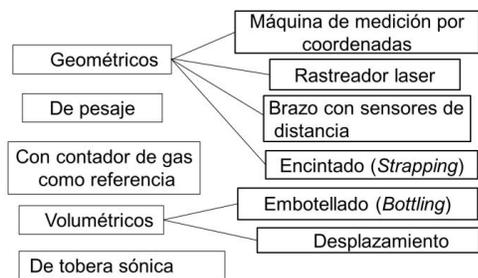


Figura 2. Métodos de calibración de campanas gasométricas.

*Con contador de gas como referencia:* Consiste en interconectar la campana gasométrica a un contador de gas patrón. El aire desplazado por esta pasa por el contador patrón que permite determinar su volumen de referencia [9].

*Tobera sónica:* En este dispositivo a medida que la relación de presión aguas arriba a aguas abajo de la tobera se eleva por encima de un valor crítico, la velocidad del gas en la garganta se acelera a la velocidad local del sonido. Un sistema de tobera sónica es conectado a la campana gasométrica. Una bomba de vacío es instalada para forzar el flujo de aire en el sistema. El volumen de aire desplazado por la campana gasométrica es determinado basado en el flujo volumétrico de referencia que pasa por la tobera sónica y el tiempo de medición [1].

#### BANCOS DE TIPO CAMPANA (GBPM-10) y (GBP-6)

El principio de medición de estos se basa en que el volumen efectivo en la campana gasométrica se utiliza como referencia durante la detección del error de los contadores de gas. Cuando la campana baja, el gas fluye a través de la tubería de conexión al contador. Un codificador eléctrico convierte la altura de caída en una señal de pulsos. El sistema de control convierte la señal de pulsos en el volumen de la campana.

#### ANÁLISIS SOBRE LOS MÉTODOS PROPUESTOS PARA LA CALIBRACIÓN DE LA CAMPANA GASOMÉTRICA

Para calibrar la campana gasométrica dentro de los métodos gasométricos el uso de un rastreador laser presenta la desventaja de requerir un desarme de la instalación de medición donde se corre el riesgo de dañarla al desmontar la campana. La importación del rastreador laser se dificulta pues es altamente costoso (más de \$ 85 000 dólares) y habría que garantizarle la trazabilidad metrológica que para este instrumento de medición aún no se ha alcanzado en Cuba. Lo mismo ocurre si se utiliza la máquina de medición de coordenadas. Respecto al uso del brazo con sensores de distancia, aparte de los problemas mencionados, su uso lleva aparejado el empleo de motores paso a paso, regla óptica, mecanismos de ensamblaje, computadora con programa específicamente diseñado para estas mediciones y micrómetros digitales con interfaz de comunicación (Más información sobre el equipamiento auxiliar ver [5]). Un sistema de medición como este es costoso y hay agregarle los gastos de mantenimiento y calibración. Lo ideal es ejecutar la calibración de la campana con el menor costo y la

mayor calidad posibles, garantizando, además, la soberanía tecnológica. Por lo tanto, no se recomienda el uso de estos instrumentos de medición patrones para calibrar en Cuba las campanas gasométricas modelos LJQ-20 y LJQ-100.

Tabla 1. Características de los bancos tipo campana

	(GBPM-10)	(GBP-6)
<b>Flujo</b>	0.016 m <sup>3</sup> /h~1.2 m <sup>3</sup> /h	0.1 m <sup>3</sup> /h~6 m <sup>3</sup> /h
<b>Contadores de gas</b>	G1.6 ~G4	G1.6~G4
<b>Modo de muestreo</b>	Lectura con los mandos inalámbricos	Captura de imágenes en movimiento
<b>Volumen total de la campana LJQ-20</b>	20 L	100 L
<b>Clase</b>	0.5	0.5
<b>Estaciones de detección</b>	10	6

El método de calibración por botella de pie cúbico no ha sido reportado como un método empleado con frecuencia en la actualidad, probablemente por el surgimiento de nuevos métodos. Igualmente sucede con el patrón de pie cúbico de Stillman. Además, las campanas gasométricas trabajan con valores de dm<sup>3</sup> o su equivalente en L. Por lo tanto, tampoco se recomienda este método de calibración para las campanas gasométricas modelos LJQ-20 y LJQ-100.

El método de desplazamiento tiene como inconveniente que consume tiempo debido al escurrimiento de la película de aceite. Por ejemplo, la calibración de una campana gasométrica de 0,2 m<sup>3</sup> (200 L) puede tomar entre 2 y 5 días con dos trabajadores. En este tiempo también influye el tamaño de las dosis, que es igual al volumen del recipiente patrón [1]. Por lo tanto, no se recomienda este método para la calibración de las campanas gasométricas de estos modelos.

El método de pesaje al igual que el volumétrico requiere gran cantidad de tiempo, depende mucho de la tecnología y habría que invertir como mínimo en una balanza adecuada, una válvula desviadora, aceite, tanque de almacenamiento, contenedor cerrado, adjuntarle todo esto a ambas campanas y hallar una forma de automatizar el proceso con un programa informático (Más información sobre el equipamiento auxiliar ver [8]). Como se observa esto sería muy costoso y complicado para una calibración que se sugiere hacer una vez cada 2 o 3 años, por lo que no se recomienda.

Para el método de calibración con contador de gas como referencia este tendría que ser calibrado en otro país cada 2 años si solo se utiliza en la calibración de la campana gasométrica, pues al ser más preciso que la propia campana no tendría trazabilidad metrológica en el país. Habría que asegurarse que el contador de gas de referencia adquirido sea compatible por sus dimensiones y funcionamiento con las campanas gasométricas en cuestión y en la primera calibración deberían participar técnicos extranjeros con experiencia en el método, donde se debería esclarecer los detalles de la calibración. Debido a estas desventajas no se recomienda.

Como último método a comentar se encuentra el método de calibración utilizando una tobera sónica como patrón. Aunque es posible hallarle trazabilidad en el país al contador de tiempo y los medidores de presión y temperaturas empleado en esta calibración, de adquirirse la tobera sónica apropiada, no se garantiza en Cuba su trazabilidad metrológica. En Cuba en el 2006 fue posible realizar la calibración de una campana gasométrica de 500 dm<sup>3</sup> por tobera de flujo crítico. Fue realizada por especialistas mexicanos quienes trajeron consigo todos los patrones, quedando la campana gasométrica trazable a patrones mexicanos como toberas de flujo crítico, medidores de tiempo, presión y temperatura. Por lo tanto se recomienda emplear otro procedimiento de medición para calibrar las campanas gasométricas que pueda ser llevado a cabo en Cuba por especialistas del país y que logre la trazabilidad metrológica en este como el procedimiento de medición basado en el método de encintado.

#### PROPUESTA DE PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN PARA LA CALIBRACIÓN DE LAS CAMPANAS GASOMÉTRICAS

Método de encintado (Fig. 3).

##### Ventajas

1. Las desviaciones de presión atmosférica, humedad relativa, temperatura no afectan la calidad de las mediciones (siempre y cuando se mantengan en los límites previstos).
2. No requiere de un desarme completo de la campana si se usa una cinta de diámetro como instrumento patrón.
3. No requiere de la importación de todos los patrones pues algunos ya se encuentran en el INIMET y la trazabilidad metrológica de los instrumentos empleados puede ser lograda en Cuba. Se emplearía un pie de rey ((0 a 200) mm, Resolución = 0,05 mm) para medir las dimensiones de la escala. Una regla metálica ((0 a 300) mm, Resolución = 1 mm) para medir la distancia entre la campana y el tanque. También para determinar la variación del nivel de aceite en la campana gasométrica modelo LJQ-100 pues esta posee un visor diseñado para esto. La campana gasométrica modelo LJQ-20 no presenta este visor por lo que se utilizaría un micrómetro de profundidad ((0 a 300) mm, Resolución = 0,01 mm) para la medición. Por último se emplearían dos cintas de diámetro ((200 a 330) mm y (300 a 620) mm, Resolución = 0,05 mm) para determinar el diámetro exterior de cada campana gasométrica.
4. La incertidumbre de calibración puede ser cercana a 0,3 %, que es un valor aceptable para el servicio que realizan las campanas gasométricas de este modelo en Cuba.

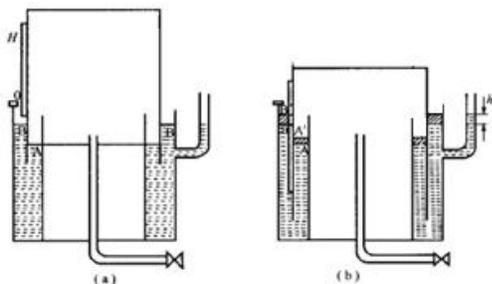


Figura 3. Corte transversal a la campana gasométrica durante el método de encintado a) Posición cero b) Posición final.

El modelo matemático en este caso sería a temperatura ambiente de (20±5) °C:

$$V = \frac{\pi}{4}(\bar{d}^2)\bar{H} + \bar{H}eB - \frac{\pi}{4}[D^2 - (\bar{d}^2)]\bar{h} + \delta V \quad (1)$$

donde  $V$  es el volumen de la campana gasométrica, en dm<sup>3</sup>;  $d$  es el diámetro promedio, en dm;  $H$  es la altura promedio de la campana gasométrica, en dm;  $e$  es el espesor de la placa de escala, en dm;  $B$  es el ancho de la placa de escala, en dm;  $D$  es el diámetro interno del canal, en dm;  $h$  es la diferencia de altura en el nivel de líquido luego del descenso de la campana gasométrica, en dm y  $\delta V$  es una fuente de incertidumbre que representa el cambio en el volumen del gas debido a la adherencia de la película de aceite a las paredes de la campana. La adherencia de la película de aceite es esencialmente la misma en el interior y el exterior de la pared de la campana. Sin embargo, si las áreas internas y externas de la superficie del aceite son lo suficientemente diferentes, las dos disminuciones del nivel de aceite pueden ser contradictorias con la diferencia de presión entre la campana y la atmósfera. Una transferencia de aceite ocurre entre el interior y el exterior de la campana para equilibrar esta inconsistencia, y se produce un error sistemático. El cambio en el volumen del gas provocado por las películas de aceite puede arrojar un margen de error relativo al volumen de la campana gasométrica de hasta -0,013 %. Quiere decir que hay un menor volumen de gas de lo que es explicado por cálculos que incluyen solo las dimensiones de la campana y el cambio en el nivel de aceite debido a la inmersión de la campana [6]. Esta cantidad se considerará en el cálculo de la componente de incertidumbre debida a la adherencia de la película de aceite.

Con anterioridad a las mediciones geométricas del procedimiento de medición se habrá desmontado la escala milimetrada que indica la altura de la campana para su calibración en un laboratorio metrológico. Se recomienda mantener la calibración periódica de los sensores de presión, humedad relativa, temperatura. Esto último es independiente del método de calibración escogido para calibrar la campana gasométrica y debe realizarse siempre que no halla peligro de dañar estos sensores o el funcionamiento de la campana gasométrica en sí. La calibración y el trabajo con las campanas gasométricas se realiza bajo límites previstos de estas magnitudes. La literatura no reporta que este método de calibración sea fuertemente afectado por estas magnitudes, aunque en el caso de la presión dentro de la campana se debe garantizar que sea la misma en cualquier posición de esta. También se recomienda calibrar el sensor de tiempo de las campanas gasométricas si se aspira hacer de ellas un patrón de flujo de gas aunque en la actualidad funcionan como patrón de volumen de gas.

Para el certificado de calibración se entregaría principalmente el valor del volumen calculado de la campana gasométrica, su incertidumbre expandida el valor del factor  $K$  (pulsos/L) con su incertidumbre.

La incertidumbre expandida de medición se expresa como la incertidumbre combinada de medición multiplicada por el factor de cobertura  $k = 2$ , la que para una distribución normal corresponde a un nivel de confianza del 95 %. (Fig. 4 y Tabla 2).

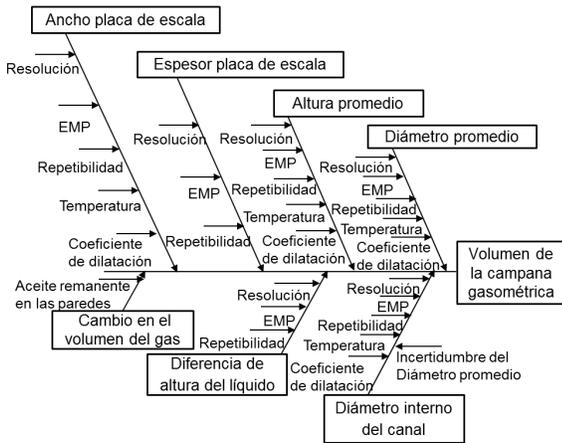


Figura 4. Diagrama de causa y efecto de las diferentes variables que influyen en la estimación de la incertidumbre del volumen de la campana gasométrica.

Para la determinación de las componentes de incertidumbre se tendrán en cuenta:

- la resolución de cada instrumento,
- el error máximo permitido (EMP) de cada instrumento,
- la repetibilidad de las mediciones,
- el coeficiente de dilatación térmica,
- la variación de la temperatura del local y diferencias de temperatura entre el instrumento y el mensurando,
- el cambio en el volumen del gas por adherencia de la capa de aceite.

La Tabla 2 se construye a partir de valores que se esperan para un procedimiento de medición como el propuesto teniendo en cuenta las dimensiones de la campana gasométrica LJQ-100, los instrumentos de medición propuestos, el modelo matemático, la Fig. 4 y el documento JCGM 100:2008 [10].

#### Desventajas

1. Pueden ocurrir errores en las mediciones de encintado debido a una desalineación de la cinta en los perímetros de la campana.
2. La campana debe tener una sección transversal cercana a un círculo verdadero ya que los cálculos dependen de relaciones entre diámetros de círculos y diámetros y alturas de cilindros. Sin embargo la producción de una campana con una sección transversal verdaderamente circular no es difícil con los métodos modernos de fabricación.
3. No incluye automáticamente los efectos de abolladuras o deformaciones significativas en la campana.
4. La cantidad de datos registrados es mayor que otros métodos.

Tabla 2. Presupuesto de incertidumbre para el volumen de la campana gasométrica de 100 dm<sup>3</sup>.

	Nombre de la Componente	$u(x_i)$	$C_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$	Contribucion (dm <sup>3</sup> ) $u_i(V)= c_i u(x_i)$
$u_d$	Diámetro promedio	0.002	57.8	0.13
$u_H$	Altura promedio	0.009	10.0	0.09
$u_e$	Espesor de la placa de escala	0.0007	4.0	0.0029
$u_B$	Ancho de la placa de escala	0.0007	0.2	0.00014
$u_D$	Diámetro interno del canal	0.018	-1.9	0.034
$u_h$	Diferencia de altura de nivel de líquido	0.009	-2.4	0.021
$u_{\delta V}$	Adherencia de la película de aceite	0.008	1	0.008
$u_c$	Incertidumbre combinada			0.16
$U$	Incertidumbre expandida (k=2)			0.3
$U_{rel}$	Incertidumbre expandida relativa			0.3 %

## II. CONCLUSIONES

Por las razones y ventajas antes expuestas se propone la implementación en Cuba de este procedimiento de medición basado en el método de encintado para la calibración de las campanas gasométricas modelos LJQ-20 y LJQ-100. Estas campanas gasométricas llevan a cabo la verificación inicial de contadores de gas de diafragma de clase 1,5 cuyos errores deben ser inferiores a  $\pm 1.5\%$  a  $Q_{max}$  (Flujo máximo) y  $0,2Q_{max}$  y a  $\pm 3\%$  a  $Q_{min}$  (Flujo mínimo) por lo que siguiendo el criterio de la norma OIML R 137-1&2: 2012 [11], la incertidumbre expandida de esta verificación debe ser menor que un tercio del EMP (EMP: Error máximo permitido). Con el propósito de asegurar una incertidumbre expandida de la verificación inicial con este valor, la incertidumbre expandida de calibración de la campana gasométrica, una de las componentes de la incertidumbre expandida de la verificación inicial, debe ser menor de 0,5 %. La incertidumbre expandida relativa de calibración de este procedimiento de medición cumpliría este criterio, por lo que la misma es aceptable para el servicio que realizan las campanas gasométricas de este modelo en Cuba hoy en día. Aunque este procedimiento de medición se realizaría por primera vez en nuestro país a campanas gasométricas de este modelo, previamente estas han sido verificadas en China por el Instituto de Metrología de Zhejiang por el método de encintado con una incertidumbre expandida relativa de 0.4 %. La calibración en Cuba de estas campanas gasométricas por este procedimiento de medición significaría la sustitución de la importación este servicio y por lo tanto un ahorro económico para el país.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Szewczyk et al., *Mechatronics 2019: Recent Advances Towards Industry 4.0*, (Springer, Switzerland, 2020), pp. 172-177.
- [2] NC 1006: 2014 "Contadores de gas de diafragma hasta 16 m<sup>3</sup>/h – Métodos y equipos de verificación".
- [3] ISO 4006:1991 "Measurement of fluid flow in closed conduits - Vocabulary and Symbols".
- [4] Yu. V. Kuzmenko, A. N. Samoilenko, *Ukrainian Metr. J.* **1**, (2015).
- [5] M. Benkova, S. Makovnik, I. Mikulecky, V. Zamecnik, *J. Metr. Soc. Ind.* **26**, 3, (2011).
- [6] J.D. Wright y G.E. Mattingly, *National Institute of Standards and Technology Special Publication* **250**, 49, (1998).
- [7] S. Hasco, *Examination of Vapor-Measuring Devices for Liquefied Petroleum Gas*, (NBS Handbook 117, Washington, D.C., 1975), pp. 1-18.
- [8] B. Pavlovic, H. Kozmar and M. Šunić, *Strojarstvo* **50**, (2008) ([www.semanticscholar.org/paper/Advances-in-gas-flow-measurement-using-weighing-Pavlovic-Kozmar/](http://www.semanticscholar.org/paper/Advances-in-gas-flow-measurement-using-weighing-Pavlovic-Kozmar/)).
- [9] J. Tonkonogij, A. Stankevicius, A. Bertasiene y A. Tonkonogovas, en *17th International Congress of Metrology*, (EDP Sciences, France, 2015).
- [10] JCGM 100:2008 "Evaluation of measurement data. Guide to the expression of uncertainty in measurement".
- [11] OIML R 137-1&2:2012, "Gas meters, Part 1: Metrological and technical requirements, Part 2: Metrological controls and performance tests".

---

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0, <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) license.



# DISEÑO Y PRUEBAS REALIZADAS EN SENSORES PIEZOELÉCTRICOS TTFM PARA LA MEDICIÓN DE FLUJO SANGUÍNEO EN IMPLANTES CORONARIOS

## DESIGN AND TESTS CARRIED OUT ON TTFM PIEZOELECTRIC SENSORS FOR BLOOD FLOW MEASUREMENTS IN CORONARY IMPLANTS

E. CARRILLO<sup>a†</sup>, M. MONTERO<sup>a</sup>, A. JIMÉNEZ<sup>a</sup>, J. E. PORTELLES-CHONG<sup>b</sup>, J. A. OTERO<sup>b</sup>

a) Instituto de Cibernética Matemática y Física (ICIMAF), CITMA, La Habana, Cuba; ernesto@icimaf.cu

b) Escuela de Ingeniería y Ciencias, Tecnológico de Monterrey, Estado de México, México.

† autor para la correspondencia

Recibido 9/03/2020; Aceptado 30/5/2020

PACS: Usos médicos del ultrasonido (medical uses of ultrasound), 87.50.yt; dispositivos piezoeléctricos (piezoelectric devices), 85.50.-n; flujo en sistemas cardiovasculares (flow in cardiovascular systems), 47.63.Cb.

La oclusión de vasos sanguíneos constituye uno de los trastornos cardiovasculares más graves y comunes, tanto en el mundo como en Cuba [1]. Cuando el paciente presenta un grado avanzado de la enfermedad, se suele aplicar la cirugía de trasplante coronario [2]. Al concluir esta, se hace necesario verificar la calidad del trasplante coronario realizado [3]. El método de medición de flujo, basado en el tiempo de tránsito ultrasónico (TTFM), es el más empleado actualmente para realizar dicha verificación, presentando alta precisión, rápida aplicación, facilidad de uso y excelente reproducibilidad [4].

El método TTFM se basa en los tiempos que tarda la señal ultrasónica en propagarse a favor y en contra, respecto al sentido de movimiento de la sangre que viaja por un vaso sanguíneo. Cuando se transmite un pulso ultrasónico desde un elemento piezoeléctrico transmisor del sensor, este viaja a través del medio líquido y a continuación, es recibido por otro elemento piezoeléctrico en dicho sensor. Seguidamente, el elemento transmisor pasa a ser receptor y el elemento receptor pasa a ser transmisor, repitiéndose el ciclo. Entonces, el tiempo que demora el ultrasonido en viajar de un sensor a otro a favor del flujo, se designa como  $t_d$  y el tiempo en contra como  $t_i$ . La diferencia de ambos tiempos  $\Delta t = (t_i - t_d)$  depende únicamente de la velocidad del flujo volumétrico y no depende de la velocidad de propagación del ultrasonido en el medio, ver Fig. 1 [4].

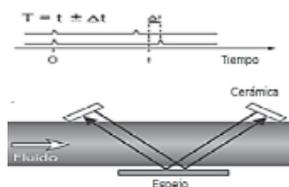


Figura 1. Principio del Método de TTFM. El rectángulo gris ancho por el que fluye la sangre representa un vaso sanguíneo.

Este trabajo presenta el diseño de un sistema de medición de flujo sanguíneo, capaz de verificar la calidad de los

implantes coronarios; es de bajo costo, de diseño propio, robusto y portátil. Se basa en la implementación y evaluación de sensores piezoeléctricos TTFM, acoplados a un módulo electrónico, logrando cuantificar el flujo sanguíneo medio a través de una arteria con una incertidumbre  $\pm 5$  ml/min, siendo una herramienta útil para la evaluación de la permeabilidad del injerto [5].

El diagrama de bloques básico del sistema de medición se muestra en la Fig. 2.

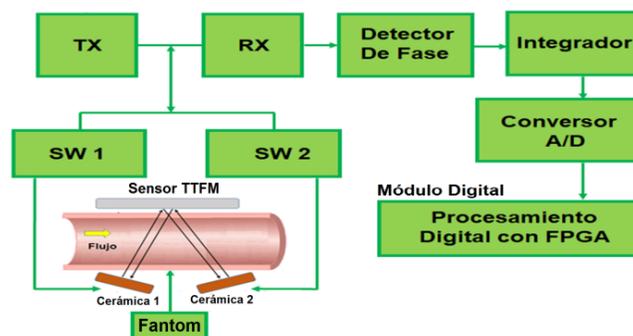


Figura 2. Diagrama de bloques simplificado del sistema TTFM.

El sensor TTFM fue construido como se muestra en la Fig. 3, y consiste en dos cerámicas piezoeléctricas, un soporte de material Rexolite, y un reflector.

Como se muestra en la Fig. 3, tanto las cerámicas piezoeléctricas como el reflector están montados sobre un soporte de cuña, cumpliendo con el principio TTFM, permitiendo medir el tiempo de tránsito de la señal ultrasónica. Las dimensiones de los elementos del sensor que se muestran en la Fig. 3 son:  $P = 6.53$  mm,  $h = 3.00$  mm,  $h1 = 7.00$  mm,  $d = 3.00$  mm,  $L = 24.59$  mm y  $\theta = 40^\circ$ .

El módulo analógico y el módulo digital, son las etapas básicas que permiten la operación del sistema [4].

En el módulo analógico, el transmisor (TX) genera un tren de 15 pulsos de 10 V. pico-pico, de frecuencia 2 MHz, a partir de señales digitales de amplitud 3.3 V, provenientes del módulo digital.

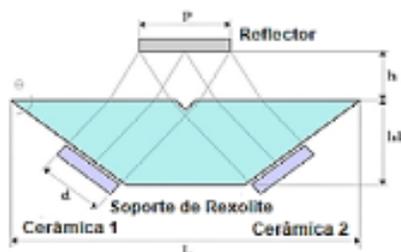


Figura 3. Diagrama para la solución geométrica de las dimensiones de la cuña del sensor TTFM hecho con rexolite.

El propio módulo digital genera además las señales que manejan los interruptores (SW1 y SW2), encargados de asegurar que, mientras una cerámica está emitiendo, la otra está recibiendo y viceversa. También genera las señales que manejan al detector de fase y al integrador.

El receptor (RX) amplifica las señales de eco provenientes del sensor, las digitaliza, y a continuación se aplican al detector de fase, que está constituido por un multivibrador TTL tipo D, el cual compara la fase del tren de pulsos recibido de 2 MHz con una señal de referencia de 2 MHz (oscilador maestro), obteniendo en su salida un tren de pulsos que contiene variaciones de fase proporcionales a la magnitud y el sentido del flujo volumétrico.

Este tren de pulsos variable se envía a un integrador de precisión en el módulo analógico, que convierte las variaciones de fase (tiempo) en variaciones de voltaje, con una incertidumbre de 2  $\nu$ V, las que se aplican a un convertidor A/D. La precisión de los valores de tiempo medidos está determinada por la gran resolución del convertidor A/D de 24 bit empleado en el sistema (20 bit confiables). Además, se efectúa una medición del caudal cada 1 ms, por tanto, se logra una gran promediación de datos, todo lo cual garantiza una lectura final muy confiable.

El código de salida del A/D se envía a un elemento reprogramable del tipo FPGA, ubicado en el módulo digital, donde se calcula el valor del caudal y además, se generan las señales de control del módulo analógico. Los valores de flujo pueden observarse en una laptop mediante el programa LabView, después de haber aplicado una calibración previa [4].

La validación del sistema se realizó con la ayuda de un fantom de flujo constante que simula la circulación sanguínea en una arteria. Este dispositivo consiste en una bomba peristáltica, dos columnas de calibración de 1,000 ml de capacidad y tres tubos de silicona que simulan las arterias a medir, con diámetros internos de 2, 3 y 4 mm respectivamente con una longitud de 14 cm. El fluido utilizado fue agua destilada a temperatura ambiente. Se extrae el fluido de la columna 1 para colocarlo en la columna 2, lo que provoca una caída vertical, pudiendo cuantificar cuántos mililitros pasan a través de la arteria simulada en un momento dado.

Se realizó un procedimiento de calibración del fantom a partir de 22 niveles de voltaje aplicados en la bomba del fantom, en un margen de 2 a 16 V, registrándose los 15 valores de flujo volumétrico correspondientes a cada nivel de voltaje medido. Con estos datos se calculó una regresión lineal para establecer la relación entre el voltaje y el flujo. El error estándar de la regresión (SEREG) se determinó utilizando (1) y también se determinó el intervalo de confianza del 95 % [6].

$$\text{SEREG} = \sqrt{\frac{S_{\phi\phi} - S_{Y\phi}^2/S_{YY}}{n - 2}}. \quad (1)$$

Una vez calibrado el fantom y a partir de este, se calibraron tres sensores ultrasónicos para determinar sus errores estándar aplicando regresión inversa (SEIREG) y el error estándar de la predicción inversa (SEIPRED) empleando un intervalo de confianza del 95 %.

Cada uno de los sensores se identificaron por el color del tallo: sensor azul claro (SAC), sensor gris (SG) y sensor azul oscuro (SAO). Se midió el voltaje a la salida del integrador obteniéndose dos mediciones para cada sensor, para 10 niveles típicos de flujo, medidos en trasplantes coronarios.

Como se puede ver en la Fig. 4, se obtuvo una relación lineal positiva y significativa ( $p=0.05$ ) entre el nivel de flujo volumétrico ( $\Phi$ ) y el voltaje ( $Y$ ) aplicado a la bomba, con un coeficiente de correlación de Pearson  $R = 0.999$ . La ecuación obtenida con la regresión lineal fue  $\Phi = 0.066564 + 0.37003$ . Para esta calibración, el error estándar de la regresión (SEREG) fue de 0.075 ml/min y se determinó un intervalo de confianza del 95 %, obteniendo una media de  $\Delta$  de  $\pm 0.1549$  ml/min.

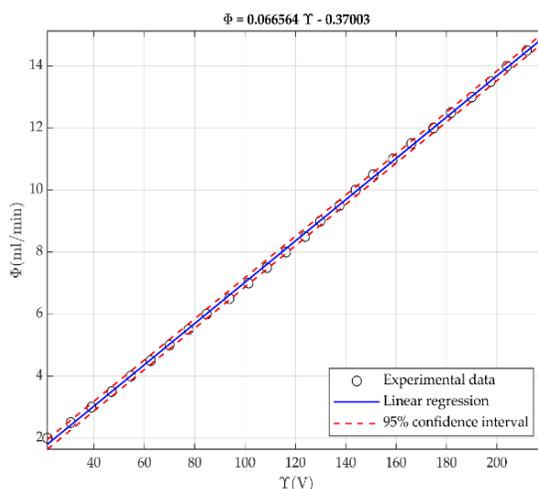


Figura 4. Diagrama de regresión de la bomba de flujo ( $\Phi$ ) a diferentes voltajes aplicados ( $Y$ ).

### Resultados de medición de flujo usando los tres sensores

Los resultados obtenidos de las mediciones de voltaje ( $Y$ ) en la salida del integrador versus flujo volumétrico ( $\Phi$ ), para el sensor azul claro, se presenta en la Fig. 5. Para cada uno de los tres sensores se determinó una regresión lineal. La ecuación obtenida de la regresión lineal para los sensores SAC, SG y SAO son:  $Y = 0.014516\Phi - 0.049562$ ,  $Y = 0.013475\Phi - 0.056192$  y  $Y = 0.014035\Phi - 0.11727$ , respectivamente.

También se determinó el intervalo de confianza del 95 % y los valores medios de  $\Delta$  obtenidos para los sensores SAC, SG y SAO fueron  $\pm 0.0537$  V,  $\pm 0.0491$  V y  $\pm 0.0694$  V, respectivamente.

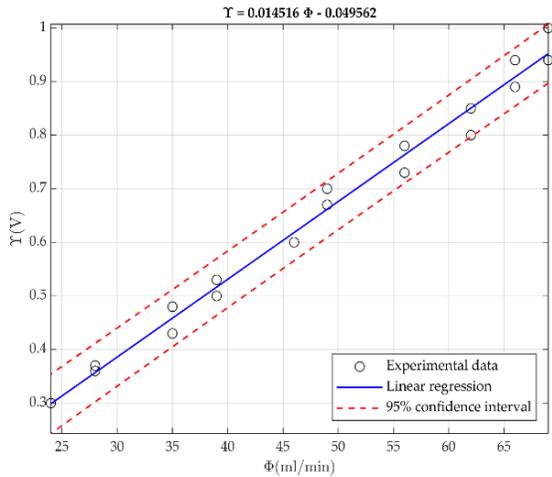


Figura 5. Diagrama de regresión de la salida del integrador ( $Y$ ) usando el sensor azul claro versus el fantom de flujo ( $\Phi$ ). Las líneas discontinuas indican los intervalos de confianza del 95 % para la línea de regresión.

Si la regresión lineal de cada sensor se describe como

$$Y = \beta_1 \Phi + \beta_2, \quad (2)$$

donde  $Y$  es el voltaje,  $\Phi$  es el flujo y  $\beta_1, \beta_2$  son las constantes de la regresión lineal; entonces el error estándar de la regresión inversa se determina como:

$$\text{SEREG} = \frac{\text{SEREG}}{\beta_1}, \quad (3)$$

donde SEREG es el error estándar de la regresión, y se expresa como:

$$\text{SEREG} = \sqrt{\frac{S_{YY} - S_{\Phi Y}^2 / S_{\Phi\Phi}}{n - 2}}. \quad (4)$$

El error estándar de la predicción inversa se determina mediante:

$$\text{SEIPRED} = \frac{\text{SEREG}}{\beta_1} \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{Y_{\text{test}} - Y}{\beta_1 S_{\Phi\Phi}}}. \quad (5)$$

donde  $Y_{\text{test}}$  es el voltaje de prueba. En las Tablas 1 y 2 se recogen los valores obtenidos para los parámetros anteriormente descritos, correspondientes a los 3 sensores estudiados, a diferentes voltajes de prueba.

Tabla 1. SEIREG obtenido para los 3 sensores.

SAC Sensor SEIREG (ml/min)	SG Sensor SEIREG (ml/min)	SAO Sensor SEIREG (ml/min)
1.765	1.738	2.359

Las Tablas 1 y 2 resumen el SEIREG y el SEIPRED obtenidos a diferentes voltajes de prueba para los tres sensores.

Tabla 2. SEIREG obtenido para los 3 sensores a diferentes voltajes de prueba.

Pruebas de Voltaje (V)	SEIPRED para SAC (ml/min)	SEIPRED para SG (ml/min)	SEIPRED para SAO (ml/min)
0.35	$\pm 1.883$	$\pm 1.836$	$\pm 2.467$
0.45	$\pm 1.841$	$\pm 1.799$	$\pm 2.429$
0.55	$\pm 1.816$	$\pm 1.782$	$\pm 2.417$
0.65	$\pm 1.809$	$\pm 1.786$	$\pm 2.430$
0.75	$\pm 1.820$	$\pm 1.810$	$\pm 2.469$
0.85	$\pm 1.849$	$\pm 1.854$	$\pm 2.532$

Como conclusión, el sistema diseñado para medir el nivel de flujo basado en el método TTFM, resultó de bajo costo, robusto y fácil de usar. Los errores obtenidos fueron inferiores a 5,3 ml/min, lo que es confiable para la evaluación de la permeabilidad del injerto [5].

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, creemos que el dispositivo es confiable para la medición del flujo sanguíneo para la evaluación de los implantes de derivación quirúrgica, lo que resulta en una herramienta de diagnóstico de bajo costo para garantizar la calidad de estas cirugías.

Se agradece al Abdus Salam ICTP, por el cual el autor E. C. B. recibió una beca. Al Departamento de Ingeniería Eléctrica, CINVESTAV, México D.F. Al cardiólogo J. Prohías del Hospital "Hermanos Ameijeiras" en Cuba, por sus valiosos consejos y ayuda.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] J.A. Finegold, P. Asaria y D.P. Francis, *Int. J. Cardiol* **168**, 934 (2013).
- [2] M.C. Weinstein y W.B. Stason, *Circulation* **66**, III56 (1986).
- [3] D'Ancona, *Heard Surg. Forum.* **4**, 243 (2011).
- [4] A. Jiménez, E. Moreno, E. Carrillo y D. Torres, *Rev. Cubana Fis.* **28**(1), 4 (2011).
- [5] Transonic Clinical Flow probes. (2019). (<https://www.transonic.com/resources/cardiothoracic/tech-notes/clinical-lowprobe-specifications>).
- [6] S. Weisberg, *Applied Linear Regression*, 3rd Ed. (John Wiley & Sons, New York, USA, 2005), pp. 21-35.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0, <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) license.



# PRIMEROS PASOS EN EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CANAL DE OLAS DE BAJO COSTO

## FIRST STEPS IN THE DESIGN AND CONSTRUCTION OF A LOW-COST WAVE FLUME

V. ÁVALOS ALVARADO, G. SÁNCHEZ COLINA, E. ALTSHULER<sup>†</sup>

Grupo de Sistemas Complejos y Física Estadística, Facultad de Física, Universidad de La Habana, Cuba; ealtshuler@fisica.uh.cu

<sup>†</sup> autor para la correspondencia

Recibido 9/03/2020; Aceptado 19/09/2020

PACS: Ocean waves (Ondas oceánicas), \*92.10.H-, 92.10.Hm; engineering (ingeniería), 89.20.Kk; engineering of natural and man-made disasters (ingeniería de los desastres naturales y debidos al hombre), 89.60.Gg

Las zonas costeras son ecosistemas altamente afectados por el cambio climático y la contaminación de origen humano. Ambas amenazas están estrechamente vinculadas a las olas [1], y resulta conveniente estudiarlas a nivel de laboratorio mediante los llamados canales de olas.

En el presente trabajo presentamos los primeros pasos en el diseño de un canal de olas que consta de un generador controlado por una aplicación gráfica en una computadora personal que envía los comandos por cable al accionamiento maniobrado por un Arduino [2]. En esta etapa del diseño, se utilizó un programa de prueba desarrollado en Matlab [3].



Figura 1. Canal de olas. En la foto no se incluye el generador de olas.

El canal de olas construido consta de 4 secciones desmontables con vidrio de 5mm de grosor y bridas rectangulares cortadas en acrílico del mismo grosor. El ensamble se realizó con silicona y resina epóxica, y las uniones fueron atornilladas para garantizar la hermeticidad. La sección transversal es de 15 por 20 cm<sup>2</sup>, y la longitud es 4.2 metros, como se aprecia en la Fig. 1.

Se seleccionó un generador de olas de pistón, por ofrecer la relación funcional más sencilla entre el desplazamiento

y los parámetros de la onda generada, además de ser el recomendado para experimentos en aguas poco profundas [4,5].

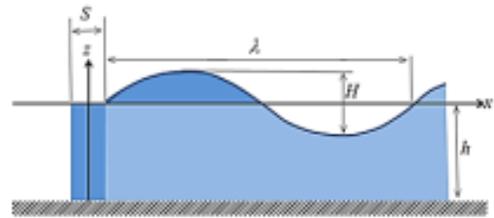


Figura 2. Parámetros básicos de una ola generada mediante un pistón.

La Fig. 2 muestra un esquema que indica cómo un generador de olas tipo pistón actuando sobre aguas de profundidad  $h$  produce una ola de amplitud  $H$  y longitud de onda  $\lambda$ . Suponiendo aguas de mediana profundidad ( $\lambda/20 < h < \lambda/2$ ), el volumen de agua que mueve el pistón al desplazarse una distancia horizontal  $S$  puede igualar al volumen en el primer semiciclo de la ola (zona azul más oscura en la Fig. 2), lo que permite llegar a [4,5]:

$$H = \frac{2\pi}{\lambda} S h. \tag{1}$$

Además, se puede probar que el período vale [4,5]:

$$T = \sqrt{\frac{2\pi\lambda}{g} \left[ \tanh \frac{H}{S} \right]^{-1}}, \tag{2}$$

con  $g \approx 9.8 \text{ m/s}^2$ . Estimemos gruesamente los parámetros reales con los que podríamos lograr olas de dimensiones razonables, dada nuestra geometría. Si el tanque de olas se llena con  $h = 15 \text{ cm}$  y deseamos obtener olas con  $H = 3 \text{ cm}$  y  $\lambda = 1 \text{ m}$ , las fórmulas (1) y (2) indican que la amplitud y el período de las oscilaciones del pistón valdrían  $S \approx 3 \text{ cm}$  y  $T \approx 0.9 \text{ s}$ , respectivamente. Suponiendo que el número de Froude se usa como constante para encontrar la relación de escala entre las otras del mar y las del canal de olas, se puede escribir [5]

$$\left( \frac{T_{\text{mar}}}{T_{\text{canal}}} \right)^2 = \frac{h_{\text{mar}}}{h_{\text{canal}}}. \tag{3}$$

Así, para los parámetros del canal  $T_{\text{canal}}$  y  $h_{\text{mar}}$  estaríamos simulando olas marinas con  $T_{\text{mar}} \approx 7$  s en aguas de profundidad  $h_{\text{mar}} \approx 9$  m (por ejemplo), que resultan valores típicos en zonas costeras.

Como los generadores de olas comerciales pueden resultar muy costosos, los autores buscaron una solución alternativa: utilizando un soporte de laboratorio de altura regulable, se logró convertir el movimiento de rotación generado por un motor, en movimiento de traslación, capaz de generar las olas (nótese que, para generar el movimiento oscilatorio correspondiente, el motor debe invertir el sentido de rotación). El motor se controló mediante un sistema Arduino [2], a su vez asociado a un programa en MatLab [3]. La Fig. 3 muestra un esquema de bloques del sistema.

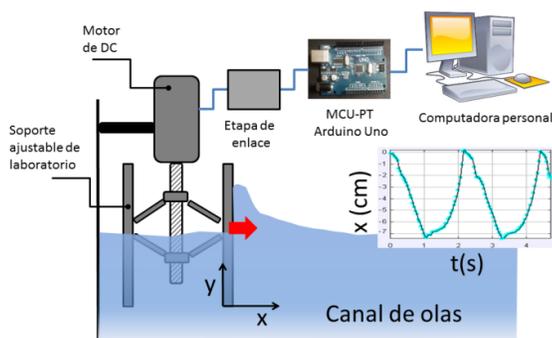


Figura 3. Esquema de bloques del sistema generador-canal de olas. Recuadro: oscilación real del generador durante una prueba de laboratorio.

La Fig. 4 muestra la etapa de enlace que permite accionar el motor. Esta consta de un circuito puente realizado con transistores MOSFET, y un circuito lógico con dos entradas controlando la velocidad de giro con una función de ancho de pulso modulado PWM.

El programa de comprobación se realizó en la interfaz gráfica de MatLab [3]. El comando se entrega al Arduino [2], que separa los valores para tomar las acciones necesarias. Los detalles de estos programas, en su versión definitiva, se reportarán en otra publicación.

La Fig. 5 muestra el diagrama de bloques global del generador de olas. Los parámetros (amplitud y frecuencia) se introducen desde una interfaz gráfica en la PC. Si se encuentran dentro del rango de parámetros posible, se envían al Arduino. Éste último controla la sección de potencia (etapa de enlace), mediante dos señales digitales: una que determina la intensidad (o parada) de la rotación, y otra que determina el sentido de giro. En el recuadro de la Fig. 3 se muestra el recorrido de un punto en la paleta que genera las olas (con flecha roja en el panel superior) medido durante una prueba del sistema en seco.

En resumen, aprovechando materiales y circuitos de bajo costo, se pudo diseñar e implementar un canal de olas de pequeñas dimensiones, en versión preliminar. El sistema definitivo deberá generar olas con forma y parámetros controlados idealmente a lazo cerrado, lo cual implica la implementación de sensores de parámetros mecánicos de las olas que retroalimenten al generador. Este será el tema de futuros trabajos.

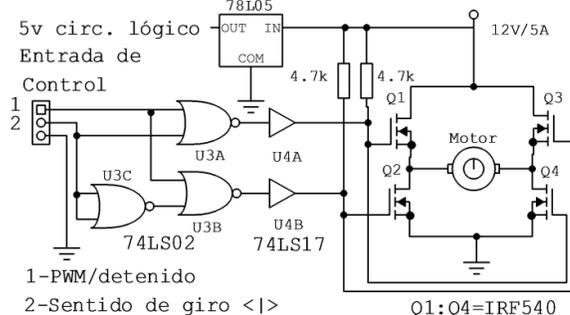


Figura 4. Etapa de enlace que permite el accionamiento del motor.

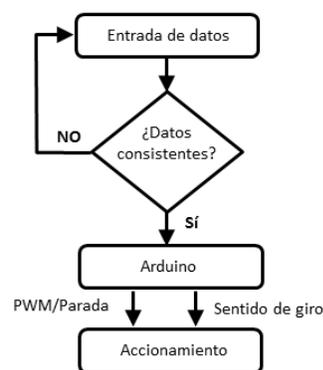


Figura 5. Diagrama que representa el funcionamiento global del generador.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] T. Dawson, J. Hambly, A. Kelley, W. Lees y S. Miller. Proc. Nat Acad. Sci. (PNAS) **117**, 8280 (2020).
- [2] M. Margolis, Arduino Cookbook (O'Reilly Media Inc., Sebastopol, CA USA, 2011).
- [3] The MathWorks, Inc., MatLab Creating Graphical User Interfaces, Natick, MA 01760-2098: MathWorks, 2015.
- [4] R. G. Dean, y R. A. Dalrymple, Wavemaker Theory. En Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists, (World Scientific Publishing Co., Singapore, 1991)
- [5] K. Samuelson, "Design and construction of an electromechanically driven wave flume". Thesis, Swartmore College, USA, 2014.



# SISTEMA DE EMISIÓN Y DETECCIÓN DE PULSOS ÓPTICOS EN EL ORDEN DE LOS NANOSEGUNDOS

## SYSTEM FOR THE GENERATION AND DETECTION OF NANOSECOND OPTICAL PULSES

S. RAYMOND<sup>a,b</sup>, J. DEL VILLAR<sup>b,c</sup>, S. STOLIK<sup>a†</sup>, D. JIMÉNEZ<sup>a</sup>, A. VALOR<sup>a</sup>, J. M. DE LA ROSA<sup>a</sup>

a) Programa de doctorado, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, ESIME Culhuacán, Instituto Politécnico Nacional, México

b) Laboratorio de Biofotónica, ESIME Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional, México; surenstolik@gmail.com<sup>†</sup>

c) Escuela de Electromecánica, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma de Santo Domingo, República Dominicana.

† autor para la correspondencia

Recibido 9/03/2020; Aceptado 20/10/2020

PACS: Fluorescence of molecules (fluorescencia de moléculas), 33.50.Dq; lifetimes molecular spectra (tiempo de vida de los espectros moleculares), 33.70.Ca; digital circuit (circuito digital), 84.30.Sk

Entre las principales tecnologías que son pilares de los avances científicos y tecnológicos del S.XXI se encuentra la fotónica, la cual tiene como herramienta fundamental la luz y su interacción con la materia [1]. Se conocen varios fenómenos y técnicas derivados de esta interacción, los cuales permiten obtener una caracterización óptica de muestras y tejidos; ejemplos de estas técnicas pueden ser: la espectroscopia de reflectancia difusa, mediciones de tiempo de vuelo de fotones y mediciones de fluorescencia.

Particularmente la fluorescencia, tiene una duración típica de alrededor de  $10^{-9}$  s y la luz emitida proviene de las transiciones del primer nivel electrónico excitado singlete al estado base. Las mediciones de fluorescencia en tejidos proveen información acerca de la presencia y distribución de moléculas específicas, fluoróforos, lo que constituye una herramienta fundamental en aplicaciones clínicas, en biología celular, entre otras [2]. Las mediciones de fluorescencia pueden ser clasificadas en dos tipos: estacionarias y resueltas en el tiempo. Las técnicas de medición en estado estacionario brindan información acerca de la intensidad de la luz fluorescente y su distribución espectral. Cuando se realiza esta técnica no es raro obtener espectros muy similares que corresponden a diferentes compuestos orgánicos, esto complica la diferenciación de los componentes que fluorescen. Por otra parte, las mediciones de fluorescencia resuelta en el tiempo permiten la observación de la evolución temporal de la radiación capturada, proporcionando información adicional sobre la estructura y composición molecular de una muestra. En esta técnica, la muestra es excitada con pulsos cortos de luz (normalmente del orden de los nanosegundos o menor) y la intensidad de la emisión fluorescente es medida con un fotodetector de respuesta rápida y un sistema de muestreo en el orden de los gigahertz (GHz) [3]. Este tipo de sistema puede ser sustituido utilizando la técnica de muestreo en tiempo equivalente: secuencial o aleatorio, para posteriormente reconstruir el perfil temporal de la señal detectada [4].

En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema que emite y detecta pulsos ópticos del orden de los nanosegundos,

para aplicaciones resueltas en el tiempo, como puede ser las mediciones de fluorescencia.

El prototipo desarrollado consta de dos módulos, uno de excitación y otro de detección. El subsistema de excitación es el encargado de crear un pulso óptico del orden de los nanosegundos para la excitación de una muestra. Este, a su vez, está compuesto de un circuito generador de pulsos eléctricos en el orden de los nanosegundos, como muestra la Fig. 1.

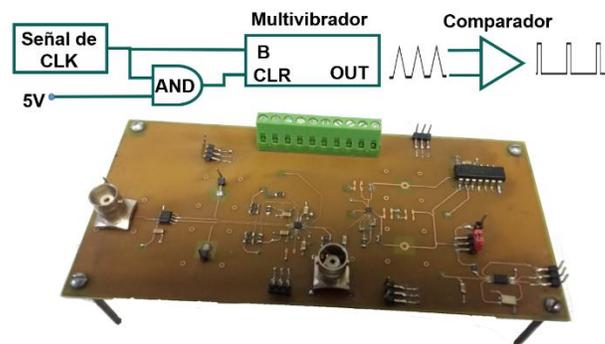


Figura 1. Circuito generador de pulsos eléctricos en el orden de los nanosegundos.

El circuito consta de un generador de señal de reloj de 20 MHz, un multivibrador (74LVC1G123-Q100), una compuerta AND y un comparador (ADCMP572). Cuando la señal de reloj llega al multivibrador, pone a este en un estado inestable, determinado por una constante de tiempo RC. Este multivibrador puede ser llevado a su estado estable mediante una señal en su PIN CLR (clear); por lo que se hace pasar la señal de reloj por una compuerta AND, que tiene tiempos de propagación bajos, generándose así pulsos en el orden de los nanosegundos. Luego, la señal pasa por un comparador para hacerla aún más angosta.

Una vez generados los pulsos eléctricos, estos son enviados a un controlador, el cual está conectado a un diodo láser, para generar pulsos ópticos en el orden de los nanosegundos.

El segundo módulo desarrollado en este trabajo (módulo de detección) está compuesto de varias partes, como puede observarse en la Fig. 2. El primer elemento que constituye el diagrama de bloques es el fotodetector, encargado de transformar la señal de fluorescencia proveniente de la muestra en una señal eléctrica.

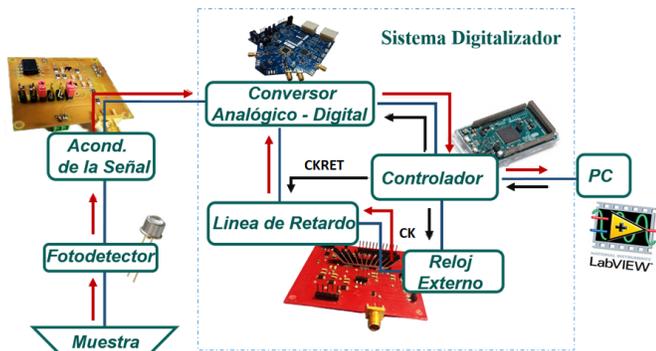


Figura 2. Sistema de detección.

El fotodetector elegido es un fotodiodo PIN de Silicio de alta velocidad, Hamamatsu S5973 modelo 02. Es de señalar que este fotodiodo posee un ancho de banda de un 1 GHz, para un voltaje inverso de 3.3 V; lo que permite obtener un tiempo de subida de 0.35 ns [5].

Como segundo elemento, ver Fig. 3, se encuentra el circuito de acondicionamiento de la señal, el cual tiene dos etapas: la primera es un circuito de transimpedancia y la otra es un circuito amplificador restador (amplificador diferencial).

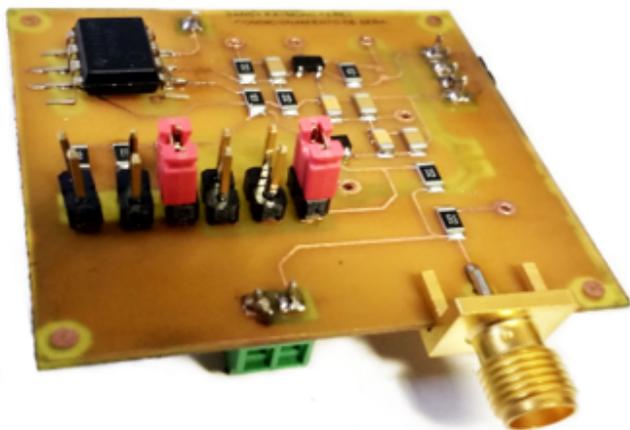


Figura 3. Circuito de acondicionamiento de la señal.

Seguidamente, se tienen el sistema digitalizador, el cual está compuesto de un convertor analógico-digital de 700 MHz (AD9269), tres líneas de retardo programables en cascada (DS1124-25), que presentan un paso de retardo (delay step) de 250 ps, un generador de reloj de 200 MHz y un controlador constituido por una Tarjeta de Evaluación Arduino Due. Todos estos elementos son los encargados de implementar el muestreo en tiempo equivalente secuencial, para la captura de los datos.

En el muestreo en tiempo equivalente secuencial, el sistema adquiere una muestra por disparo, como se indica en la Fig. 4. Cuando se detecta un disparo, se realiza la adquisición después de un retardo muy corto, pero muy bien definido; cuando se produce el próximo disparo, se añade un pequeño incremento de tiempo  $\Delta t$  a este retardo, y el digitalizador adquiere otra muestra. Los puntos de observación aparecen de izquierda a derecha de forma secuencial a lo largo de la forma de la señal. Este retardo tan precisamente medido es lo que proporciona a los sistemas de muestreo secuencial su inigualable resolución de tiempos [5].

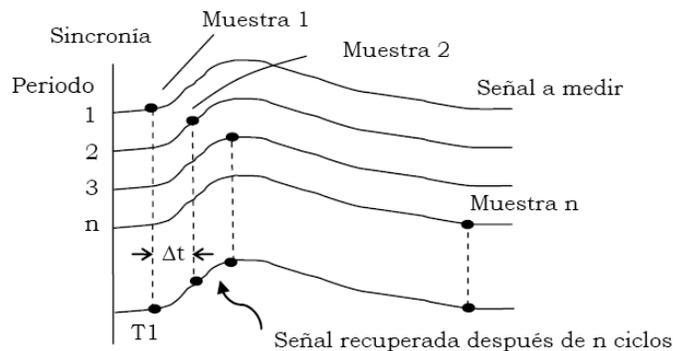


Figura 4. Muestreo en tiempo equivalente secuencial.

Los datos capturados por el sistema digitalizador son enviados hacia una computadora, donde se implementó una interfaz utilizando LabVIEW, que permite interactuar con el sistema de generación y detección de pulsos. En la Fig. 5, se puede observar la medición de los pulsos ópticos generados, aplicando la técnica de muestreo en tiempo equivalente secuencial. Cabe señalar que el sistema emplea un método de reducción de errores, el cual consiste en realizar varias capturas de un mismo dato y luego efectuar un promedio de estos.

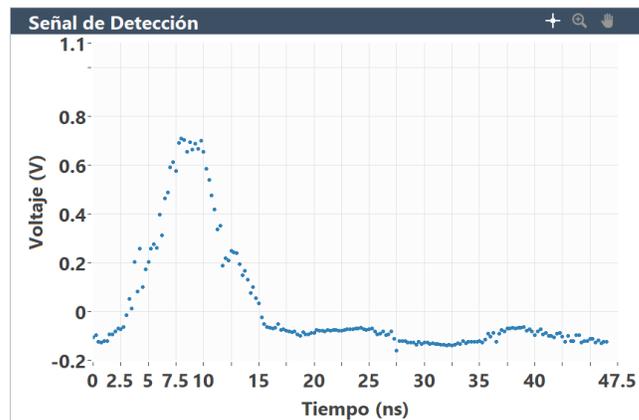


Figura 5. Pulso óptico medido con el sistema desarrollado.

Otra medición realizada con el sistema desarrollado fue medir pulsos generados con el láser NPL41B, de la compañía Thorlabs. Este láser puede generar pulsos ópticos con anchos (FWHM) desde  $(6 \pm 1)$  ns hasta  $(38 \pm 3)$  ns. En la Fig. 6 se muestran estos pulsos medidos con nuestro sistema de detección, los cuales tienen un ancho de 6.5 ns. Cabe señalar que en este caso se han utilizado las tres líneas de retardo en

cascada, con el objetivo de poder abarcar una mayor ventana temporal.

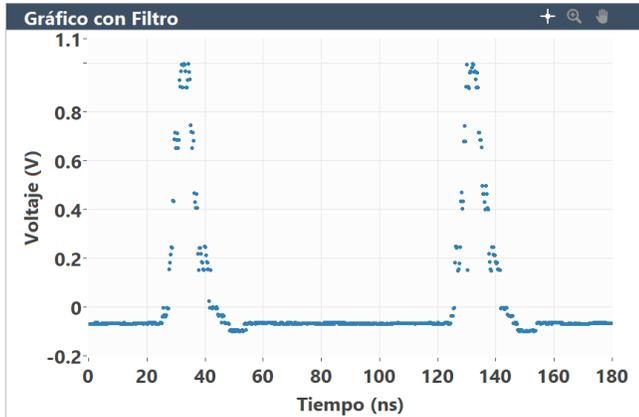


Figura 6. Pulso óptico (láser NPL41B) medido con el sistema de detección desarrollado.

En general, se puede decir que en este trabajo se desarrolló un prototipo para la generación y medición de pulsos ópticos rápidos, con duraciones del orden de los nanosegundos. Para ello se implementó un digitalizador de alta velocidad y un circuito de acondicionamiento de señal, con anchos de banda de 70MHz y 1GHz, respectivamente.

El sistema creado permite medir señales analógicas de hasta  $2 V_{p-p}$ , generando un barrido máximo de 192 ns con una resolución temporal de 250 ps. Por otra parte, la técnica de muestreo en tiempo equivalente secuencial es funcional, y su algoritmo permite agregar un método simple de supresión de ruidos. La resolución y el ancho de banda del digitalizador y del circuito de acondicionamiento desarrollado, cumplen con los requerimientos necesarios para que el sistema pueda ser aplicado en mediciones resueltas en tiempo, como pueden ser mediciones de fluorescencia.

#### BIBLIOGRAFÍA

- [1] M.L. Calvo Padilla, *Revista de la Facultad de Ciencias* **8**, 69 (2015).
- [2] L. Marcu, P.M.W. French y D.S. Elson, *Fluorescence Lifetime Spectrosc. and Imaging*. (Taylor & Francis Group, 2015), pp. 1-10, pp. 87-89.
- [3] E.E.L. Vallejo, "Métodos de análisis de fluorescencia resuelta en el tiempo", Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, 2010.
- [4] Y. Chao, J. Liu, *Rev. Sci. Instrum.* **87**, 125106 (2016).
- [5] E. Moreno, R. Galicia, D. Jiménez, J. M. de la Rosa, S. Stolik, *J. Appl. Res. and Technol.* **10**, 2 (2012).

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0, <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) license.



# DESARROLLO DE UN SISTEMA FOTOACÚSTICO PARA LA DETERMINACIÓN DE COEFICIENTES DE ABSORCIÓN ÓPTICOS

## DEVELOPMENT OF A PHOTOACOUSTIC SYSTEM FOR THE DETERMINATION OF OPTICAL ABSORPTION COEFFICIENTS

R. DÍAZ FUENTES<sup>a,b</sup>, S. STOLIK<sup>b†</sup>, A. VALOR<sup>b</sup> Y J.M. DE LA ROSA<sup>b</sup>

a) Programa de Doctorado en Comunicaciones y Electrónica, ESIME Culhuacán, Instituto Politécnico Nacional, México.

b) Laboratorio de Biofotónica, ESIME Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional, México; sstolik@ipn.mx<sup>†</sup>

† autor para la correspondencia

Recibido 9/03/2020; Aceptado 20/10/2020

PACS: Optical Absorption coefficient (coeficiente de absorción óptico), 78.20.Ci; absorption spectra of solids and liquids (espectro de absorción de sólidos y líquidos), 78.40.-q; photoacoustic effect (efecto fotoacústico), \*43.35.Ud, 78.20.Pa.

Una de las propiedades más importantes a tener en cuenta en las terapias y diagnósticos médicos basados en la interacción de la luz con los tejidos es la absorción óptica de estos medios porque solo la luz absorbida es capaz de producir cambios físicos, químicos o fisiológicos en el tejido [1]. Además, el espectro de absorción de una molécula dada es una huella de su presencia en un tejido. Sin embargo, determinar el coeficiente de absorción en medios turbios con métodos ópticos constituye un desafío dada la dificultad de distinguir inequívocamente si la disminución del flujo radiante se debe a la absorción o es producida por el esparcimiento. Una solución viable podría ser el uso del efecto fotoacústico debido a que este depende únicamente de la energía radiante absorbida en el medio [2]. En 1880 el efecto fotoacústico fue descubierto por el científico Alexander Graham Bell. Más de 90 años después, se desarrolló el modelo teórico de Rosencwaig y Gersho que describió dicho efecto [3]. Al ser este un fenómeno que depende también de las propiedades térmicas del material estudiado [4], esta técnica se ha utilizado para la caracterización térmica de materiales [5].

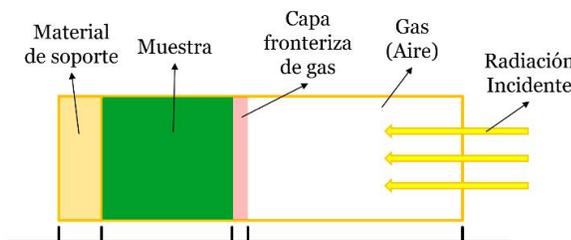


Figura 1. Esquema representativo del efecto fotoacústico en una celda cerrada.

En la técnica fotoacústica, se utiliza una celda cerrada, dentro de la cual se encuentra el material que se va a investigar (Fig. 1). En la muestra ocurre la absorción de radiación óptica incidente modulada; produciendo el calentamiento periódico de la muestra. A continuación, las capas de gas más cercanas a la muestra se calientan con la misma frecuencia. El calentamiento de esta sección del gas produce su expansión, y su posterior enfriamiento, una contracción. Así, la capa

gaseosa vecina a la muestra actúa como un pistón sobre el resto del gas y genera una onda de presión que puede ser detectada con un micrófono.

El sistema fotoacústico se presenta en la Fig. 2 y cuenta con tres partes fundamentales: el módulo donde se encuentran los láseres, el módulo electrónico donde se encuentran el modulador, el demodulador y los demás circuitos requeridos para el correcto funcionamiento del sistema y un módulo externo con la celda fotoacústica y una computadora.

Para la medición de la señal fotoacústica se escogió un micrófono de tipo electreto. La celda fotoacústica, en la cual se encuentra el micrófono con su circuito preamplificador, es un módulo externo al sistema de medición, el cual se encuentra conectado al sistema mediante un cable coaxial SMA. La celda fotoacústica tiene dos orificios: uno superior por donde se deposita la muestra y por donde incide la luz a través de una ventana de cuarzo, y uno lateral donde se ubica el micrófono. En la Fig. 3 se muestra la celda fotoacústica desarrollada, junto al circuito de preamplificación y su circuito de alimentación externo.

Como fuentes de excitación del sistema fotoacústico se utilizan diodos láseres de diferentes longitudes de onda de 405, 450, 520, 532, 638, 658, 784 y 980 nm. Se diseñó un controlador de láseres que funciona como una fuente de corriente controlada por voltaje. Debido a la necesidad de controlar varios diodos láseres diferentes, se decidió fabricar los controladores de tipo modular, lo que permite su intercambio si se decidiera usar nuevos láseres, independientemente de los parámetros eléctricos que estos tengan.

En la Fig. 4 se muestra un esquema del sistema óptico desarrollado para el direccionamiento del haz de luz del láser seleccionado hacia la muestra. Todos los láseres están montados sobre una base circular apuntando hacia el centro, donde se encuentra un prisma triangular acoplado a un motor de pasos que con su rotación permite seleccionar el láser que se desea utilizar. Para controlar el punto de referencia se implementó un sistema optoelectrónico de posición.

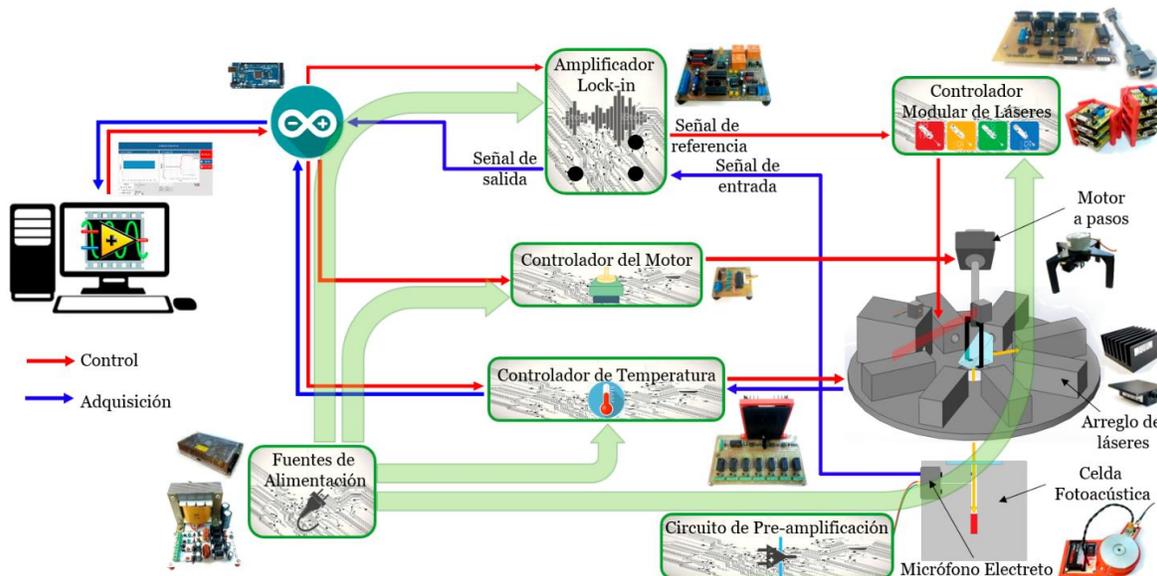


Figura 2. Diagrama en Bloques del Sistema Fotoacústico.

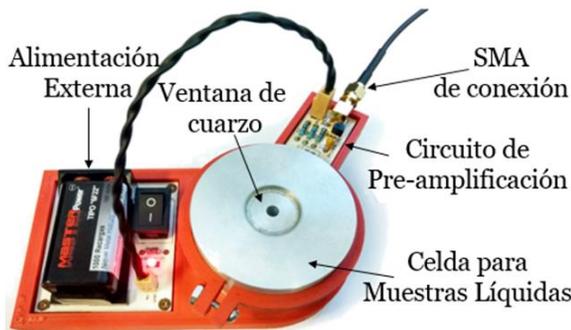


Figura 3. Celda fotoacústica desarrollada.

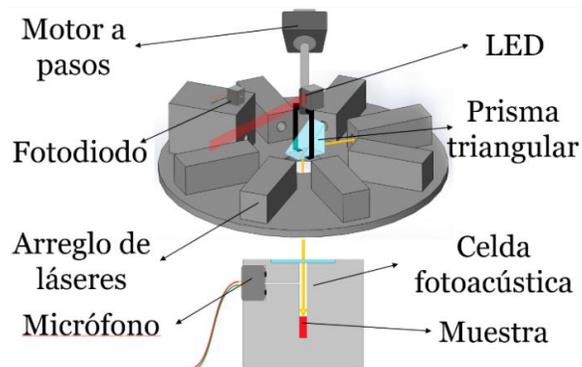


Figura 4. Esquema del sistema óptico.

Una parte muy importante en este sistema es el bloque modulador y demodulador, encargado de modular la luz incidente sobre la muestra en la celda fotoacústica y de demodular la señal acústica detectada a través de un esquema de detección sincrónica de doble fase [6]. Esto permitió la sustitución de un amplificador Lock-In comercial para la medición de la señal fotoacústica en fase (canal X) y en cuadratura (canal Y). Esto permitirá reconstruir la señal fotoacústica obteniendo tanto su amplitud como el cambio de fase respecto a la señal de referencia incidente. Tomando en cuenta que el aumento de la temperatura afecta el funcionamiento de los diodos láser, se desarrolló un control PID que permite sensar y controlar la temperatura de cada uno de los láseres individualmente. La temperatura de los láseres es mantenida haciendo uso de disipadores y de celdas Peltier, como puede verse en la Fig. 5, en su parte superior izquierda.

Se desarrolló una interfaz en la plataforma LabView 2016 que permite la comunicación LabView-Arduino. Este último fue programado para centralizar el control de todo el sistema y se comunica con una computadora donde se visualiza la interfaz de usuario y se almacenan los datos de las mediciones. El usuario es capaz de establecer todos los parámetros del experimento a realizar y visualizar y guardar la información adquirida.

Se diseñó un gabinete con acrílico de 5 mm de espesor que contiene todos los módulos (Fig. 5). Sus dimensiones son  $81 \times 45 \times 20$  cm.



Figura 5. Vista frontal e interna del gabinete.

Para la realización de mediciones preliminares se utilizaron cilindros plásticos en forma de pastillas. Los cilindros son de 4 mm de diámetro y 2.2 mm de altura y se imprimieron con plástico ABS en colores transparente, blanco, azul, rojo

y negro. El experimento consistió en medir las señales fotoacústicas producida con cada una de estas pastillas y por la celda vacía con los diferentes láseres con frecuencias de modulación de 30, 100, 500, 1000 y 2000 Hz. En la Fig. 6 se muestran las gráficas correspondientes a la amplitud de la señal fotoacústica en cada uno de los canales (X y Y) dependiendo de la longitud de onda obtenidas con la pastilla negra y la pastilla blanca. Se aprecia que existen diferencias en el comportamiento de las señales fotoacústicas, las cuales son producidas por el cambio de muestra, de láser o de frecuencia de modulación de los láseres. Este resultado corrobora que el sistema es sensible a estos cambios. Como es de esperar, el gráfico correspondiente a la pastilla negra es el que tiene mayores valores de amplitud de la señal fotoacústica.

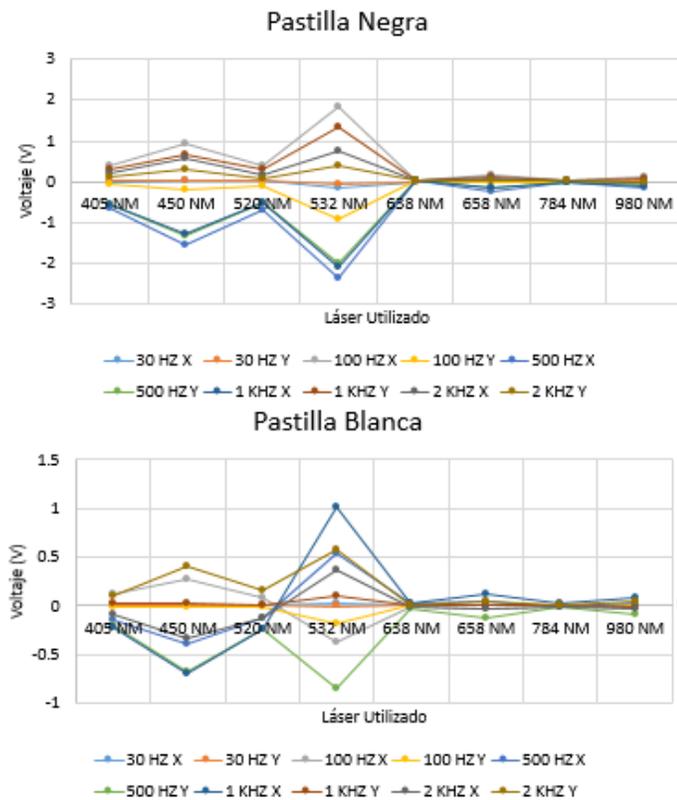


Figura 6. Mediciones para las pastillas negra y blanca.

La Fig. 7 resume los resultados de la medición de la amplitud de la señal fotoacústica en los canales en fase y cuadratura (X y Y) para los láseres de 450, 532 y 658 nm. Con la revisión de estas gráficas se distingue cómo existe un patrón entre ellas que se corresponde a que todas son del mismo material; su principal diferencia es la amplitud de las señales medidas, aunque guardan proporcionalidad entre ellas. Los cambios de signo de la señal medida en ciertas regiones es otra similitud en todos los gráficos. Estos cambios de signo para ciertas frecuencias de modulación están relacionados con los cambios en fase de la señal fotoacústica respecto a la señal de referencia. Esta relación se está estudiando para poder reconstruir la señal fotoacústica en magnitud y fase y así determinar los coeficientes de absorción óptica de las muestras.

Se observó que con el aumento de la frecuencia de modulación la desviación estándar de la amplitud de la señal

disminuyó desde  $\pm 44$  mV para mediciones a 30 Hz hasta 3.7 mV para mediciones a 2000 Hz. Esto está relacionado con la mejora en respuesta del micrófono. Para poder realizar mediciones a bajas frecuencias y por lo tanto poder obtener señales de zonas más profundas del material se requiere utilizar micrófonos con mejor respuesta a bajas frecuencias.

Con el objetivo optimizar el sistema desarrollado, se trabaja en una serie de mejoras de hardware y software. Esto permitirá obtener el coeficiente de absorción óptico de manera directa y además permitirá que el sistema desarrollado se utilice como una herramienta robusta en otras técnicas fototérmicas.

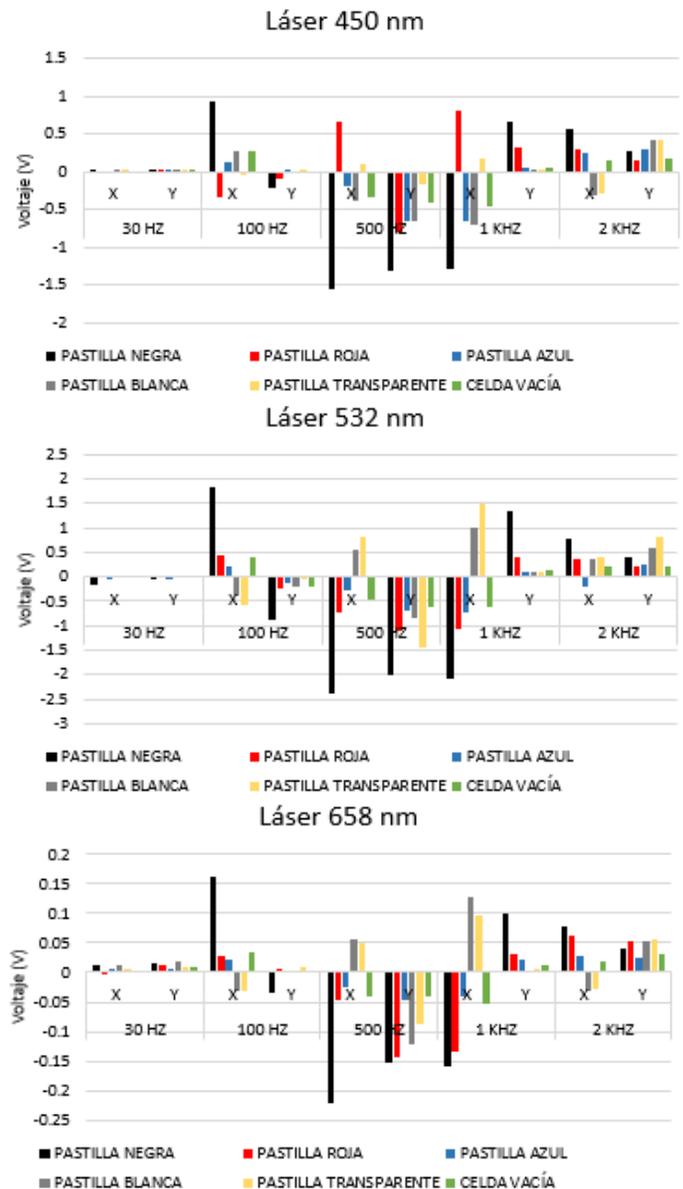


Figura 7. Mediciones para los láseres de 450, 532 y 658 nm.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] B. W. Pogue y M. S. Patterson, J. Biomed. Optics **11**, 041102 (2006).
- [2] E. Bossy y S. Gigan, Photoacoustics **4**, 22 (2016).

[3] A. Rosencwaig y A. Gersho, *J. Appl. Phys.* **47**, 64 (1976).

[4] F. Gao, *et. al*, *Photoacoustics* **7**, 1 (2017).

[5] B. Verstraeten, J. Sermeus, R. Salenbien, J. Fizez, G. Shkerdin y C. Glorieux, *Photoacoustics* **3**, 64 (2015).

[6] J. S. Navarro, "Sistema de medición de la concentración de PpIX en tejido sintético empleando la detección sincrónica", Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, 2016.

---

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0, <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) license.



# OBTENCIÓN DE PARÁMETROS ÓPTICOS DE LA PIEL A PARTIR DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE REFLECTANCIA DIFUSA RESUELTA ESPACIALMENTE

## DETERMINATION OF OPTICAL PARAMETERS OF SKIN BASED ON SPATIALLY RESOLVED DIFFUSE REFLECTANCE MEASUREMENTS

J. E. AZCUY<sup>a</sup>, A. R. VALOR<sup>b</sup>, S. STOLIK<sup>b†</sup>, J. M. DE LA ROSA<sup>b</sup>

a) Programa de Doctorado en Comunicaciones y Electrónica, ESIME Culhuacán, Instituto Politécnico Nacional, México.

b) Laboratorio de Biofotónica, ESIME Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional, México; surenstolik@gmail.com<sup>†</sup>.

† autor para la correspondencia

Recibido 9/03/2020; Aceptado 20/10/2020

PACS: Light effects on biological systems (efecto de la luz en sistemas biológicos), 87.50.W-; Monte Carlo methods in biological physics (método de Monte Carlo en física biológica), 87.10.Rt, 87.15.ak, 87.16.af; electronic circuits (circuitos electrónicos), 07.50.Ek, 84.30.-r

En dermatología los sujetos se clasifican en fototipos acorde a la escala de Fitzpatrick [1]. Este sistema de clasificación es subjetivo, como puede apreciarse de los criterios usados y resumidos en la Tabla 1, pues se basa en la interpretación del especialista y del propio paciente, sobre sus características físicas para determinar su resistencia a la radiación solar y su capacidad de bronceado.

La clasificación de la piel tiene un papel muy importante en la fototerapia [2], ya que las dosis de radiación aplicadas al paciente dependen de sus propiedades ópticas. Dada la subjetividad del sistema actual, existe la necesidad de realizar una caracterización objetiva de los fototipos y esto sería posible con la obtención de los coeficientes de absorción ( $\mu_a$ ) y esparcimiento reducido ( $\mu_s$ ) de la piel.

Tabla 1. Criterios empleados para la clasificación en fototipos según la escala de Fitzpatrick.

Fototipo	Descripción
I	Muy sensible a la luz solar
II	Sensible a la luz solar
III	Sensibilidad normal a la luz solar
IV	Tiene tolerancia a la luz solar
V	Piel oscura y de tolerancia alta
VI	Piel negra y de altísima tolerancia

Por otra parte, se ha demostrado que las propiedades ópticas de los tejidos cambian dependiendo de su estado [3], debido a que las propiedades ópticas de los tejidos dependen de su composición bioquímica, su estructura celular y de la longitud de onda de la radiación incidente. De esta manera, conocer los parámetros ópticos puede brindar una herramienta precisa y muy útil para el diagnóstico de disímiles enfermedades de la piel.

Un método que brinda información sobre estos parámetros es la Reflectancia Difusa Resuelta Espacialmente (RDRE), en la cual se determina la fracción de luz reemitida desde diferentes

puntos del tejido, ver Fig. 1(a), a diferentes distancias desde la fuente, Fig. 1(b).

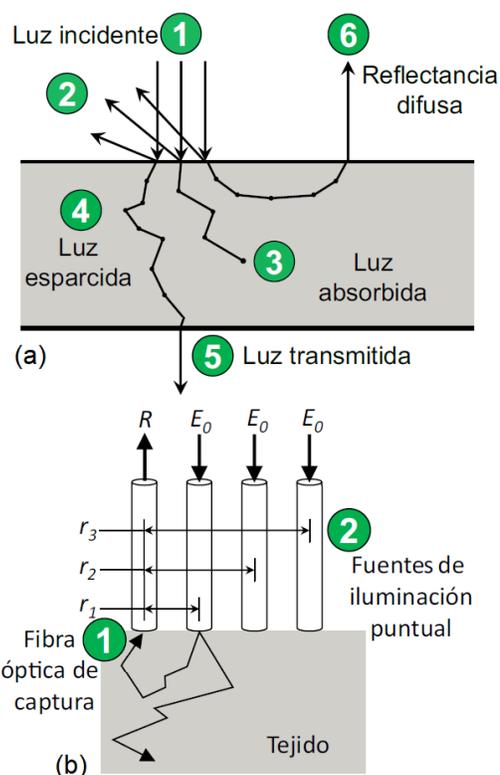


Figura 1. (a) Interacción de la luz con la piel. (b) Esquema de la medición de RDRE.

Un esquema de medición de RDRE se puede lograr haciendo uso de diodos láser, como fuentes, y arreglos de fibras ópticas, y fotodiodos como detectores. En este trabajo, se desarrolló un modelo físico para la obtención de los parámetros ópticos del tejido a partir de mediciones de RDRE.

La propuesta y validación del modelo se hizo a partir de Simulaciones de Monte Carlo [4] (SMC), en un modelo de tres

capas de la piel empleando parámetros ópticos reportados en la literatura [5,6]. Las SMC entregan soluciones exactas de las interacciones de los fotones con medios turbios, lo que permite realizar experimentos virtuales muy fiables. El procedimiento se presenta en la Fig. 2.

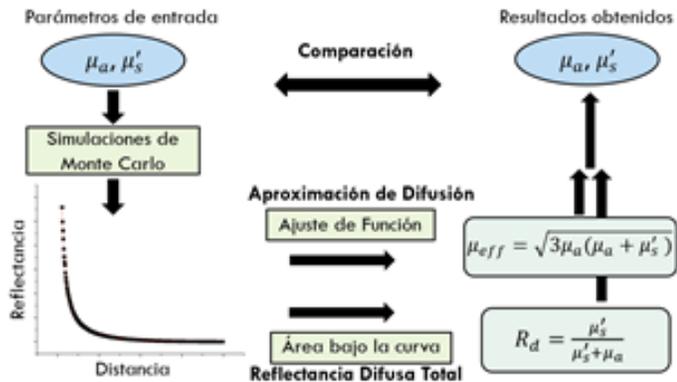


Figura 2. Esquema del desarrollo del modelo para la determinación de los coeficientes ópticos a partir de un experimento virtual con Simulaciones de Monte Carlo.

Básicamente, del gráfico de RDRE, se obtiene el coeficiente de atenuación efectivo ( $\mu_{eff}$ ) por el ajuste a la curva de la función solución de la ecuación de transporte radiativo en la aproximación de difusión [7] y, por otra parte, se realiza el cálculo de la Reflectancia Difusa Total (RDT), que se modela como el área bajo la curva de la gráfica de RDRE integrada por todo el ángulo polar. Ambas magnitudes están relacionadas con los coeficientes ópticos según las ecuaciones:

$$\mu_{eff} = \sqrt{3\mu_a(\mu_a + \mu_s)} \quad (1)$$

$$R_d = \frac{\mu_s}{\mu_s + \mu_a} \quad (2)$$

Los parámetros ópticos se obtienen resolviendo el sistema de ecuaciones (1) y (2) y se comparan los valores obtenidos con los iniciales a la entrada de la SMC para verificar que se encuentran dentro de los intervalos correctos.

Para la aplicación del modelo a mediciones reales, se desarrolló un sistema de RDRE, el cual se describe más adelante, ver Fig. 3.



Figura 3. Sistema de medición de RDRE.

El esquema empleado para la determinación de los coeficientes ópticos de tejidos reales es el mismo expuesto sustituyendo el gráfico de RDRE obtenido de las SMC por el medido con el sistema RDRE.

El sistema de medición desarrollado consta de dos etapas, una de excitación de los láseres y otra de adquisición de la señal de reflectancia, como muestra el esquema de la Fig. 4.

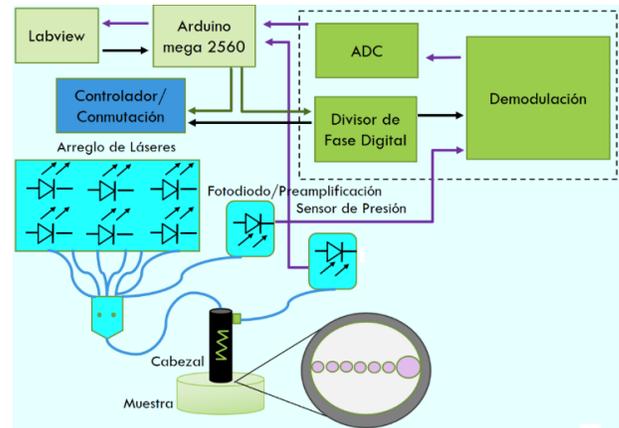


Figura 4. Esquema del sistema de medición de RDRE.

La etapa de excitación la compone el controlador de los láseres, un divisor de fase digital y una placa de conmutación que permite seleccionar el láser. La etapa de adquisición de la señal la constituyen un fotodiodo, el circuito de transimpedancia y una placa de demodulación que procesa la señal mediante la técnica de detección sincrónica de doble fase. Esta técnica se emplea ya que la señal luminosa de interés, reemitida por el tejido, se encuentra inmersa en ruido luminoso.

El sistema de medición de RDRE consta de 18 láseres de tres longitudes de onda diferentes (658, 830 y 980 nm), 12 espejos dicróicos de diferentes longitudes de onda de corte, 24 lentes colimadoras, seis fibras ópticas de iluminación de 100  $\mu\text{m}$  y una fibra óptica de captura de 600  $\mu\text{m}$ . Con estos componentes se construyeron seis módulos ópticos (Fig. 5), uno por cada fibra óptica de iluminación. Las siete fibras ópticas están montadas en un arreglo lineal en la punta de exploración, la cual consta con un sensor de presión opto-mecánico mediante el cual se monitorea en tiempo real la presión que ejerce la punta sobre el tejido en cada medición, debido a que las mediciones de RD dependen de la presión ejercida.



Figura 5. Módulo óptico (uno de seis). En azul se observan los soportes de los espejos dicróicos y en negro los disipadores de los tres láseres.

Con el sistema descrito se realizaron experimentos para determinar el coeficiente de absorción y de esparcimiento reducido de la piel. Primeramente, se midió la RDRE en la parte interior del antebrazo a cinco sujetos con fototipos de piel diferentes (Fig. 6).

El modelo permitió diferenciar cuantitativamente los valores de RDT y parámetros ópticos entre cada uno de ellos. El orden descendente de los valores de RDT (Tabla 2) obtenidos coincidió con el orden ascendente de la clasificación de fototipos de cada sujeto según Fitzpatrick.

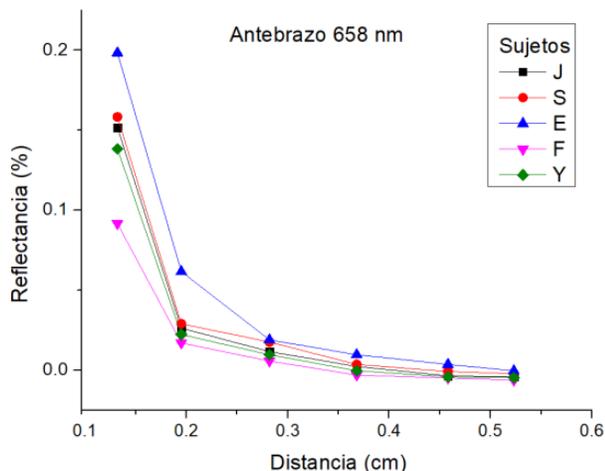


Figura 6. Medición de RDRE para cinco sujetos con diferentes fototipos a 658 nm.

Los signos al lado del fototipo en la última columna de la Tabla 2 se refieren a la ubicación del valor que otorga el clasificador dentro del intervalo para cada fototipo.

Tabla 2. Parámetros ópticos de cinco sujetos.

Sujetos	RDT	$\mu_{eff}$ (cm <sup>-1</sup> )	$\mu_a$ (cm <sup>-1</sup> )	$\mu_s$ (cm <sup>-1</sup> )	Fototipo
E	0.836	10.11	2.36	12.01	III-
S	0.660	10.56	3.55	6.90	III-
J	0.341	12.12	5.67	2.94	III+
Y	0.313	12.90	6.17	2.81	III+
F	0.152	13.58	7.22	1.29	IV+

Además, se realizaron mediciones a un individuo con padecimiento de vitiligo en zonas de piel sana y afectada. Los gráficos de RDRE (Fig. 7) obtenidos mostraron una marcada diferencia entre las mediciones tomadas en estas dos áreas.

La Tabla 3 muestra los valores obtenidos de los parámetros ópticos para este experimento. Los valores elevado de  $\mu_a$ , y bajo de RDT correspondientes a la zona de la piel pigmentada respecto a los valores bajos del coeficiente de absorción y elevado de RDT obtenidos para la zona sin pigmentación, evidencian, como era de esperar, la ausencia de melanina como principal cromóforo en la epidermis.

En esta investigación se desarrolló un modelo físico para determinar los coeficientes de absorción y esparcimiento reducido de la piel a partir de la curva de RDRE experimental. Se construyó un sistema que permite realizar mediciones de

reflectancia difusa resuelta espacialmente.

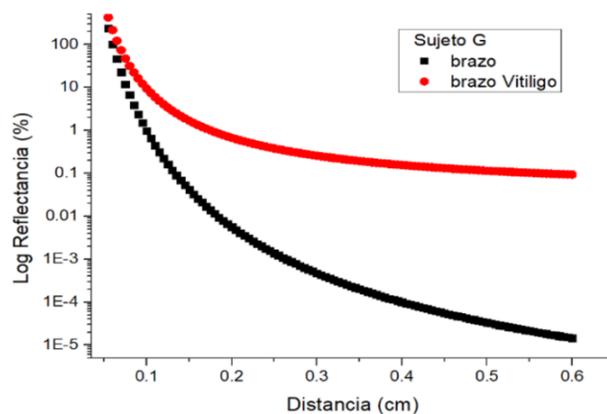


Figura 7. Valores de RDRE obtenidos en escala logarítmica para sujeto con vitiligo.

Tabla 3. Parámetros ópticos de sujeto con vitiligo.

Mediciones en piel	RDT	$\mu_{eff}$ (cm <sup>-1</sup> )	$\mu_a$ (cm <sup>-1</sup> )	$\mu_s$ (cm <sup>-1</sup> )
Sana	0.118	9.90	5.40	0.72
Afectada	0.889	8.61	1.53	12.5

En las mediciones realizadas a cinco sujetos de fototipos distintos se evidenciaron diferencias en los valores de los coeficientes ópticos entre ellos. A tal punto que a los cuatro sujetos que presentaban el fototipo III les correspondían valores diferentes de RDT,  $\mu_{eff}$ ,  $\mu_a$  y  $\mu_s$ ; demostrando la resolución de valores del sistema y su capacidad diferenciadora. Las mediciones realizadas a la persona con vitiligo arrojaron diferencia significativa tanto para la RDRE como entre los valores de RDT (piel pigmentada = 0.118 vs piel no pigmentada = 0.889).

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] T. B. Fitzpatrick, Arch. Dermatol **124**, 6 (1988).
- [2] Wang, T., Hsueh, L. and Liao, J. Cutan. Med. Surg. **17**, 1 (2013).
- [3] J. J. Scarisbrick, et. al, Optical Society of America **5141**, 1 (2003).
- [4] L. Wang S. L. Jacques y L. Zheng, Comput. Meth. Programs Biomed. **47**, 2 (1995).
- [5] M.J. C. Van Gemert, S. L. Jacques, H.J.C. M. Sterenborg y W. M. Star, IEEE Trans. Biomed. Eng. **36**, 12 (1989).
- [6] F. Narea, S. Vivas, A. Muñoz, Óptica Pura y Aplicada **48**, 3 (2015).
- [7] T.J. Farrell, M.S. Patterson y B. Wilson, Med Phys. **19**, 4 (1992).

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0, <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) license.



# UNA ASIMETRÍA RARAMENTE ANALIZADA EN LAS ECUACIONES DE MAXWELL

## AN ASYMMETRY RARELY ANALYZED IN MAXWELL'S EQUATIONS

J. J. LLOVERA<sup>†</sup>, C. OSABA

Departamento de Física, Instituto de Ciencias Básicas, Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría" Cujae, Cuba; llovera@automatica.cujae.edu.cu<sup>†</sup>

<sup>†</sup> autor para la correspondencia

Recibido 9/03/2020; Aceptado 27/09/2020

PACS: Research in physics education (investigación en enseñanza de la física), 01.40.Fk; errors in physics classroom materials (errores en materiales escolares de física), 01.50.Zv; learning theory and science teaching (teoría de aprendizaje y ciencia de la enseñanza), 01.40.Ha; classical electromagnetism, Maxwell equations (electromagnetismo clásico, ecuaciones de Maxwell), 03.50.De.

El sistema de ecuaciones de Maxwell es objeto de interés desde el punto de vista didáctico dado su carácter esencial como base de la teoría electromagnética clásica.

Las asimetrías entre sus ecuaciones relacionadas con la inexistencia de polos magnéticos aislados son discutidas en los cursos de Física General; sin embargo, la que existe entre el signo negativo de la ecuación correspondiente a la ley de Faraday y el signo positivo del término denominado densidad de corriente de desplazamiento en la ecuación de Ampere-Maxwell queda sin discutir en la mayoría de los libros de texto [1–6]. La discusión de esta asimetría permitiría profundizar en la interpretación de estas ecuaciones.

Comencemos por señalar que, por lo general, la regla de Lenz, que determina el signo menos en la ley de Faraday es

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (1)$$

interpretada como manifestación de la ley de conservación de la energía y no como expresión del principio de Le Chatelier como sí lo han hecho otros autores, el propio Le Chatelier inclusive [7–11].

El enunciado original de Lenz no se refiere a energía sino a acción electrodinámica, al enunciar que:

*“Cuando una fuerza que actúa sobre una corriente eléctrica primaria induce una corriente secundaria, la dirección de esta corriente secundaria es tal que su acción electrodinámica se opone a la fuerza actuante”* [12].

Vale destacar que este enunciado data de 1833, año en el cual aún no se había identificado el término energía ni, menos aún, una ley de su conservación, la que se debe fundamentalmente a Helmholtz en 1847 catorce años después [13].

Sin embargo, en 1884 Le Chatelier publicó uno de los enunciados de su principio relacionado con la entonces denominada “fuerza electromotriz”; término empleado ya desde época. Este enunciado es el siguiente:

*“Toda variación de fuerza electromotriz producida en un punto de un sistema en equilibrio provoca una deformación del sistema que*

*induce al punto considerado, si ella se produjese sola, una variación de fuerza electromotriz de signo contrario”* [7].

En el año 1888 el principio fue generalizado siendo reconocido como “Ley de oposición de la reacción a la acción” expresándolo como se expone hoy:

*“Todo sistema en equilibrio experimenta, debido a la variación de uno solo de los factores del equilibrio, una variación en un sentido tal que, de producirse sola, conduciría a una variación de signo contrario del factor considerado”* [14].

Su relación causal con la segunda ley de la termodinámica, que determina el sentido en que responde un sistema en equilibrio cuando en el mismo se producen procesos de desequilibrio, (como ocurre cuando varía temporalmente la inducción magnética del campo en cierta región), ha sido demostrada. [10, 15].

Así, desde un punto de vista histórico lógico y en correspondencia con las leyes de la Física, parece más razonable fundamentar didácticamente la regla de Lenz como manifestación del principio de Le Chatelier en el proceso de inducción electromagnética.

Si en la ecuación de Ampere-Maxwell analizamos la aparición de una componente magnética  $\vec{B}$  como resultado de un proceso similar de inducción debida a la variación temporal del campo eléctrico entre las placas de un capacitor, clásico ejemplo empleado en los textos para introducir el concepto “corriente de desplazamiento”, vemos que no existe un signo negativo en el término correspondiente en dicha ecuación:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}. \quad (2)$$

¿Qué resultado obtendríamos si para determinar el sentido del rotacional de un supuesto campo magnético “inducido” entre las placas del capacitor razonáramos como lo hacemos para orientar el sentido del rotacional del campo eléctrico inducido en la ley de Faraday?

Aplicando el principio de Le Chatelier, concluiríamos que al variar la intensidad del campo eléctrico en el capacitor

aparecería un campo eléctrico “inducido” (reactivo) con sentido opuesto a la variación de la intensidad de dicho campo y en consecuencia, el sentido del rotacional del campo magnético entre las placas del capacitor resultaría opuesto al realmente medido como se puede apreciar en la Fig. 1.

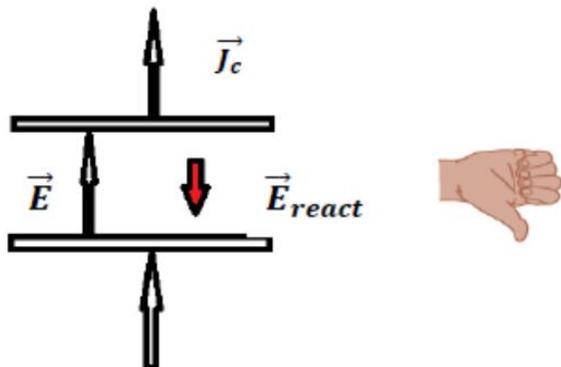


Figura 1. Supuesto sentido del rotacional del campo magnético opuesto al sentido real en un capacitor cargándose.

¿En qué radica esta contradicción? Está asimetría es argumentada de diversas maneras por algunos autores.

Por ejemplo, según Yavorsky y Detlaf: *“La diferencia de los signos de los segundos miembros de las ecuaciones de Maxwell está de acuerdo con las leyes de conservación de la energía y de Lenz.*

*(los subrayados son de los autores) Si los signos de  $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$  y  $\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$  fueran iguales, el incremento infinitesimal de uno de los campos acarrearía un aumento ilimitado de ambos, y la disminución infinitesimal de uno de los campos conduciría a la completa desaparición de ambos” [16].*

Otro autor, I. E. Tamm, solo comenta: *“Señalemos que los segundos miembros de las ecuaciones (se refiere a las ecuaciones de Maxwell que estamos analizando (N de A.) tienen distintos signos. Esta diferencia se debe a que las líneas de fuerza del campo magnético  $\vec{H}$ , excitado por las corrientes de desplazamiento forman con el sentido de estas corrientes un sistema dextrógiro, mientras que los sentidos de los vectores  $\vec{E}$  y  $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$  se encuentran en correlación inversa” [17].*

Como han demostrado otros autores [5, 18–22], la denominada “corriente de desplazamiento” no tiene asociada componente magnética inducida, de modo que realmente no existe desequilibrio alguno por lo que no tiene sentido aplicar el principio de Le Chatelier en este caso ya que en realidad no existe tal campo eléctrico reactivo. Se explica así la asimetría entre los signos con independencia de que también se conserve la energía.

Enfocada didácticamente, la contradicción que aparece al aplicar el principio de Le Chatelier para establecer el sentido del rotacional del campo magnético entre las placas de un capacitor en proceso de carga/descarga, permite discutir el origen de esta componente magnética, debida únicamente a las corrientes de conducción transitorias en los conductores y en las placas del capacitor [20, 21], aspecto este que no queda

bien discutido en los textos de Física.

En resumen, resulta más razonable justificar el signo menos en la Ley de Faraday a partir del principio de Le Chatelier, siendo la regla de Lenz una expresión particular de este principio. El principio de conservación de la energía debe ser analizado en el proceso pero no como el que determina el sentido del rotacional del campo eléctrico inducido en la ley de Faraday. Parece útil prestar más atención al principio de Le Chatelier en el curso de Física General desde la impartición de la Termodinámica considerando que su alcance predictivo es mayor del que se estudia en los cursos de Química General.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Halliday, R. Resnick y K. S. Krane, Física, parte 2 (John Wiley & Sons, 1992), p.p. 214-215.
- [2] F. W. Sears, M. W. Zemansky, H. D. Young y R. A. Freedman, University Physics: with Modern Physics, 13th Ed. (Addison-Wesley, Pearson Education, 2012), p.p. 976-978.
- [3] R. Serway y J. W. Jewett Jr, Física para ciencias e ingenierías, Vol. 2 (Thomson, México, 2013), p.p. 894-895.
- [4] S. G. Kalashnikov, Electricidad, (Ciencia y Técnica, La Habana, 1969), p.p. 229-230.
- [5] E. M. Purcell, Electricity and Magnetism, Vol. 2 (Ed. Revolucionaria, La Habana, 1970), p.p. 236.
- [6] P. A. Tipler y G. Mosca, Física para la ciencia y la tecnología. Electricidad y magnetismo, luz, (Reverté, Barcelona, 2010).
- [7] H. L. Le Chatelier, Comptes Rendus Académie de Sciences **99**, 786 (1884).
- [8] J. Lotka, Proc. Am. Acad Arts Sci. **57**, 21 (1922).
- [9] V. Thomsen, J. Chem. **77**, 173 (2000).
- [10] P. Bazarov, Thermodynamics, (Ed. Revolucionaria, La Habana, 1969) p.p. 272.
- [11] A. N. Matveev, Física Molecular, (MIR, Moscú, 1987), p.p. 227.
- [12] H. F. Lenz, St. Petersburg Acad. Of Sci. **29**, XI (1833).
- [13] H. L. Helmholtz, Über die Erhaltung der Kraft, (Natural Philosophy, 1853), p. 114.
- [14] H. L. Le Chatelier, Recherches expérimentales et théoriques sur les Équilibres chimiques, (Dunod, París, 1888).
- [15] O. Gündüz y G. Gündüz, Phys. Essays **27**, 3 (2014).
- [16] B. M. Yavorsky y A. A. Detlaf, Prontuario de Física, (MIR, Moscú, 1983), p.p. 353.
- [17] E. Tamm, Fundamentos de la teoría de la electricidad, (MIR, Moscú, 1979) p.p. 440.
- [18] P. French y R. J. Tessman, Am. J. Phys. **31**, 201 (1963).
- [19] H. S. Zapolsky, Am. J. Phys. **55**, 77 (1987).
- [20] J. Roche, Eur. J. Phys. **19**, 155 (1998).
- [21] O. D. Jefimenko, Eur. J. Phys. **25**, 287 (2004).
- [22] J. A. Milson, Am. J. Phys. **88**, 194 (2020).

---

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0, <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) license.



# EL PBL Y SU INSUFICIENTE APARATO CONCEPTUAL. SU USO EN CURSOS DE FÍSICA

## THE PBL AND ITS INSUFFICIENT CONCEPTUAL APPARATUS. THEIR USE IN PHYSICS COURSES

A. ALEJO DIAZ<sup>a†</sup>, J. LLOVERA GONZÁLEZ<sup>a</sup>

Departamento de Física, Instituto de Ciencias Básicas, Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría”, Cujae; alejo@automatica.cujae.edu.cu

† autor para la correspondencia

Recibido 9/03/2020; Aceptado 25/07/2020

PACS: Physics education (enseñanza de la física), 01.40.-d; teaching methods (métodos de enseñanza), 01.40.gb; research in physics education (investigación en enseñanza de la física), 01.40.Fk; classical electromagnetism, maxwell equations (electromagnetismo clásico, ecuaciones de Maxwell), 03.50.De

El PBL (Problem Basic Learning) o ABP (Aprendizaje Basado en Problemas), ha comenzado en el último decenio a tener presencia en la universidad cubana.

Recientemente se ha insistido en nuestro país en intensificar el vínculo universidad-empresa creándose inclusive en algunas universidades cubanas parques tecnológicos. Sin embargo, además de una concertación entre directivos, académicos y empresariales con esa finalidad, se requiere fundamentalmente de un cambio en el paradigma de la enseñanza universitaria. Entonces el Aprendizaje Basado en Problemas pudiera ser una alternativa a considerar en los actuales Planes de Estudio E y en especial para la enseñanza de la Física universitaria.

Se ha esbozado en un artículo anterior una aproximación a la comprensión del PBL desde la didáctica cubana [1].

La didáctica cubana desarrolló un modelo para el proceso de la EAC (Enseñanza-Aprendizaje en Contextos) [2] que por su cercanía al PBL ambos tienen elementos comunes. El uso del PBL en la enseñanza de las ciencias, la enseñanza de la ingeniería y en particular la enseñanza de la Física es profuso en la actualidad. Su uso aparece tanto a nivel universitario como, aunque con menos frecuencia, en niveles de enseñanza precedentes [3].

Pueden encontrarse otras metodologías vinculadas para el aprendizaje basado en proyectos o basado en estudio de casos. Esto último se muestra para la enseñanza de la astronomía en un artículo relativo a exoplanetas de N. Ruiz y otros [4]. Este trabajo muestra la posibilidad de introducir el estudio de la astronomía en los cursos de Física, tema debatido recientemente en el marco del último simposio de la SCF, sin embargo, es el PBL el que tiene más presencia en la literatura especializada.

En esta dirección, existen trabajos que involucran la enseñanza de las ciencias básicas y en particular de la Física y la Química en cursos de ingeniería [5,6] y otros que van directamente a las asignaturas específicas del currículum de ingeniería [7].

Una de las dificultades que encontramos en cursos diseñados

con PBL es que, en ocasiones, la forma en que se presenta didácticamente el problema utilizado no es de la manera más abarcadora posible haciendo necesario, por esta razón, utilizar más de un problema para tratar una temática. Lograr resumir varios contenidos de aprendizaje en un problema es uno de los retos del PBL.

Ocurre también que al no ser desplegado el problema en todas sus aristas este no es totalmente comprendido disminuyendo su poder motivador.

En la enseñanza de la Física para la Ingeniería en Telecomunicaciones y Electrónica hemos utilizado diferentes problemas para tratar variados contenidos. Estos se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Problemas y temáticas relacionadas.

Problemas	Contenidos afines a enseñar
¿Cómo funciona una antena Yagui? ¿Cómo capta la señal y cómo transmite la misma al TV?	Ondas electromagnéticas viajeras y estacionarias. Efecto Pelicular (Skin).
¿Cuál es el principio de funcionamiento de un microscopio electrónico?	Propiedades ondulatorias de las micro partículas.
¿Es el calentamiento global una amenaza real propiciada por la acción del hombre?	Radiación térmica
¿Cómo se diseña un arma nuclear?	Desintegración radioactiva.
¿Cómo se resuelve la contradicción de la Ley de Ampere para casos no estacionarios?	Corriente de desplazamiento. Campos eléctricos variables en el tiempo como fuente de campos magnéticos.

Ejemplifiquemos esto en el caso de contradicciones que aparecen al aplicar Ley de Ampere para procesos no estacionarios.

Es usual ver como se aborda en los textos de Física la contradicción que se presenta al analizar el cumplimiento de esta ley durante el proceso de carga o descarga de un capacitor,

eligiendo una trayectoria “amperiana” convenientemente escogida alrededor del conductor que puede “subtender” a la vez dos superficies, una de las cuales es directamente atravesada por el conductor estando la otra colocada en el espacio vacío entre las placas del capacitor. Ver por ejemplo Sears [8].

En la práctica en su impartición hemos comprobado que mostrar exclusivamente la contradicción de esta forma no resulta suficientemente convincente, y mucho menos motivante para los estudiantes.

Sin embargo, hemos empleado otra manera de hacerlo didácticamente complementaria y mucho menos utilizada en los textos de Física General, en este caso desarrollada en el lenguaje nada controversial de la matemática. Veámosla:

Formulamos e interpretamos la Ley de Ampere para corrientes estacionarias en forma diferencial:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j}. \quad (1)$$

Aplicamos la divergencia a ambos miembros:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{\nabla} \cdot \vec{j}. \quad (2)$$

Como se sabe el miembro derecho resulta nulo. Utilizamos ahora la ecuación de continuidad como expresión del principio de conservación de la carga eléctrica

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{j} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}. \quad (3)$$

Y hacemos notar que el término  $\frac{\partial \rho}{\partial t}$  sólo será cero en un proceso estacionario por lo que concluimos que la ley de Ampere presenta una grave inconsistencia y de la forma en la que está escrita solo puede utilizarse en el caso estacionario. De esta forma a los alumnos se les demuestra, de manera inobjetable sobre un análisis físico-matemático, la contradicción antes mencionada y se va discutiendo física en la presentación.

Otra contradicción puede quedar abierta como problema a resolver en este ejemplo: Si el campo magnético entre las placas del capacitor está determinado únicamente por la corriente de desplazamiento ¿cómo influye en este resultado la componente de dicho campo inherente a los conductores que puede ser calculada aplicando la ley de Biot-Savart? ¿Qué rol juega el principio de superposición en este caso? Para una mejor comprensión de la propuesta puede verse el texto de Purcell [9].

Se vinculan así más de un contenido de aprendizaje en un mismo problema y se complementa desde la física su presentación para motivar su estudio. Con este mismo enfoque, en el curso se utilizaron adicionalmente otros problemas que permiten una vinculación con la especialidad de ingeniería en cuestión como los ya referidos en la Tabla 1.

En los Planes de Estudio E se persigue como una finalidad explícita el vínculo entre teoría y práctica, los vínculos interdisciplinarios, evaluaciones finales de asignaturas a través de proyectos, y otros; con esta impronta se realiza el

diseño curricular de las mismas. Es oportuno recomendar, en función de lograr estas premisas, otros enfoques didácticos en específico como este aplicables a diferentes temas de la Física que enseñamos.

Los Planes E se elaboraron bajo encargos ministeriales con ciertas normativas en su confección entre otras las siguientes: “Lograr una integración adecuada entre las actividades académicas, laborales e investigativas” [10].

Una de las vías posibles para estructurar las asignaturas con esa intencionalidad es utilizar esta variante del PBL.

La forma en la que se ha desarrollado la Didáctica de la Física en Cuba, desde el punto de vista de sus fundamentos epistemológicos y conceptuales, es en cierta medida diferente al enfoque occidental.

Mientras que en nuestros presupuestos didácticos privilegamos enfoques en los cuales los modelos teóricos y los aparatos conceptuales tienen un peso sobresaliente, la didáctica occidental tiene una visión más pragmática y utilitaria. Es ese enfoque el que encontramos mayormente en los artículos sobre PBL consultados, lo que puede estar afectando su mayor utilización en la enseñanza.

Para la enseñanza de la Física, el PBL ofrece una vía para elevar los niveles de motivación y lograr una integración con otras disciplinas.

La interdisciplinaridad no se obtiene solamente a través del diseño curricular que, por sí solo, no propicia hacer tangible la intencionalidad didáctica en esa dirección.

Los planes de estudio E de la Educación Superior cubana tienen una serie de encargos atinados y oportunos. Sin embargo, es necesario recomendar en los propios planes de estudio una estrategia didáctica que obligue, o al menos propicie, la integración de las disciplinas favoreciendo una enseñanza más moderna y eficaz. El PBL pudiera ser una de las posibles vías a seguir.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. A. Alejo. “El PBL y el insuficiente aparato conceptual”. Memorias EFING. 17ma. Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura. (2014) La Habana, Cuba. [ISBN:978-959-261-467-3]
- [2] J. A. Alejo. “Una Propuesta Didáctica para la Enseñanza-Aprendizaje en Contextos de la disciplina Física General en las carreras de ingeniería. Aplicación en la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones y Electrónica”. Tesis de doctorado, ISPJAE, Cuba, 2006.
- [3] F. Leyva. Sophia **21**, 209 (2016).
- [4] N. Ruiz. y col. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, **25**, 191 (2017)
- [5] M. S. Peña. M y col. “Metodología ABP para el Estudio de la Física”. Memorias III Congreso Internacional en Inteligencia Ambiental, Ingeniería de Software y Salud Electrónica y Móvil. AmITIC (2019)
- [6] M.F Cañas. “Problem Based Learning (PBL), competencias and Chemistry teaching for Engineers”. 17th LACCEI International Multi-Conference for

Engineering, Education, and Technology: "Industry, Innovation, and Infrastructure for Sustainable Cities and Communities", Jamaica. 24-26 July (2019)

[7] X. Elkorobarrutia y col. "Coordinación en PBL integrando múltiples asignaturas: Una experiencia práctica". Actas del Simposio-Taller Jenuei, vol. 2, pp. 21-27 (2017).

[8] F. W. Sears, M. W. Zemansky, H. D. Young, y R. A.

Freedman, "Física Universitaria", 13ra Ed. (Pearson Education, Addison Wesley, 2013), pp. 927-930

[9] E. Purcell, "Electricity and Magnetism", (Edición Revolucionaria. Instituto del Libro. La Habana, 1965), pp. 256-263

[10] Ministerio de Educación Superior de Cuba "Documento base Plan E", pp. 12 y 15, (2016)

---

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0, <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) license.



# SIMULACIONES DE LOS EXPERIMENTOS DEL TUBO DE LEYBOLD Y DEL ESTUDIO DE LA RADIACIÓN TÉRMICA

## SIMULATIONS OF LEYBOLD TUBE EXPERIMENTS AND THE STUDY OF THERMAL RADIATION

J. ORTEGA BRETO

Departamento de Física, Instituto de Ciencias Básicas, Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría” CUJAE, La Habana, Cuba; justoo@automatica.cujae.edu.cu<sup>†</sup>

<sup>†</sup> autor para la correspondencia

Recibido 9/03/2020; Aceptado 27/09/2020

PACS: Physics learning (aprendizaje de la física), 01.50.H-; laboratory computer use (uso de computadoras en el laboratorio), 01.50.Lc; computer software and software reviews (software de computadoras y revisiones de software), 01.50.hv

En general se comprende cuál es la importancia del laboratorio de Física en el nivel universitario, pero sucede que el equipamiento experimental necesario suele tener precios elevados y se requiere una preparación adicional de los profesores. Los costos del equipamiento se pueden disminuir mediante la construcción de los equipos a partir de partes y piezas de uso, como el tubo de pantalla de un televisor [1], lo que implica de todos modos más trabajo por parte de los profesores. Otra variante, entre otras, consiste en acceder de forma remota y controlar un experimento didáctico, como se ha hecho en el caso del experimento de Thomson [2].

En el presente trabajo se trata el diseño de dos simulaciones computarizadas de experimentos de Física para el nivel universitario, con el objetivo de mejorar la preparación del estudiante y acercarlo al experimento real.

Las simulaciones se han desarrollado mediante el sistema de autor Easy Java Simulations, conocido por EJS. Aunque se dice que los sistemas de autor simplifican las tareas de programación algunas personas no están de acuerdo con esto. EJS es un software libre con herramientas para el desarrollo de gráficos dinámicos. Puede descargarse desde el sitio <http://fem.um.es/EJS> [3].

Se han tomado como base el experimento del tubo de Leybold, a partir del cual se puede comprobar el valor de la relación carga– masa del electrón y el experimento sobre el estudio de la radiación térmica. El tubo de Leybold posee un cátodo emisor de electrones que son acelerados bajo una tensión  $V_a$ . Los electrones se mueven en una región donde existe un campo magnético aproximadamente uniforme, de inducción magnética  $\vec{B}$  perpendicular a la velocidad de dichos electrones. Estos se encuentran dentro de un bulbo de vidrio en cuyo interior hay un gas enrarecido que produce cierta luminiscencia al interactuar con el haz y esta luminiscencia permite visualizar la trayectoria circular de los electrones.

El campo magnético es producido por unas bobinas de Helmholtz como se muestra en el problema 28.67 de la referencia [4].

Puede demostrarse que la relación carga-masa del electrón

está dada por:

$$\frac{e}{m_e} = \frac{8V_a}{B^2 D^2} \quad (1)$$

donde  $m_e$  es la masa del electrón,  $e$  su carga,  $v$  su rapidez,  $D$  el diámetro del haz de electrones y  $B$  el valor de la inducción magnética.

La simulación consiste en un fichero ejecutable (.jar) que se ha empaquetado a partir de la simulación original y necesita para funcionar la instalación de una máquina virtual de java. Aparecen simultáneamente dos ventanas: la de ejecución (Fig. 1) y la de descripción (Fig. 2). En la primera se muestra una fotografía del equipo experimental junto con dos deslizadores que se utilizan para variar la intensidad de la corriente en las bobinas y la tensión aceleradora.

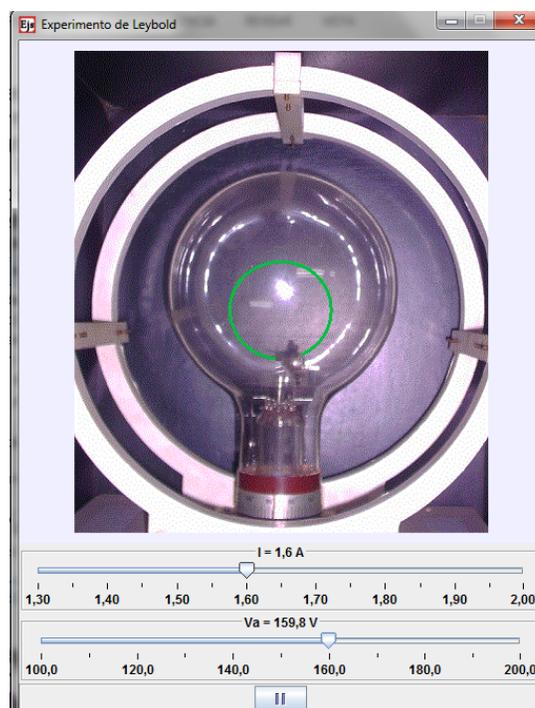


Figura 1. Ventana de ejecución de la simulación sobre el experimento de Leybold. Se muestra el haz de electrones.

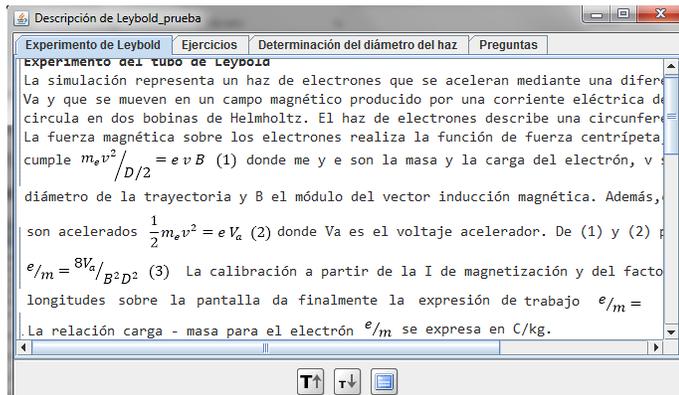


Figura 2. Ventana para la descripción del experimento. Fundamentos teóricos.

La expresión de trabajo es:

$$\frac{V_a}{I^2} = 2.35 \cdot 10^{-9} \frac{e}{m_e} D^2, \quad (2)$$

ya que es necesario tener en cuenta que la inducción magnética en (1) debe expresarse en función de la intensidad de la corriente  $I$  que genera el campo magnético, lo que requiere una calibración y también hay que relacionar las coordenadas en pantalla con las dimensiones del equipo real.  $D$  se expresa en dichas coordenadas,  $V_a$  en V y el valor de la relación carga-masa en C/kg.

La ventana para la descripción del experimento contiene varias pestañas: fundamentos teóricos (Fig. 2), ejercicios, determinación del diámetro del haz (Fig. 3) y preguntas (Fig. 5). Los ejercicios de la simulación son los siguientes:

- Realice al menos diez mediciones del diámetro  $D$  del haz de electrones para diez valores diferentes de la tensión  $V_a$  con un valor constante de la intensidad de corriente de magnetización.
- Construya un gráfico de  $D^2$  contra  $V_a/I^2$  utilizando el método de los mínimos cuadrados. Calcule su pendiente.
- Con la pendiente y la expresión (2), calcule la relación carga-masa del electrón.

Se obtiene para la relación carga-masa:

$$\frac{e}{m_e} = 1.75 \cdot 10^{11} \text{ C/kg}. \quad (3)$$

El gráfico con los resultados de la simulación se muestra a continuación en la Fig. 4.

La ecuación de ajuste es:

$$D^2 = 412.4 \left( \frac{V_a}{I^2} \right) + 2.080, \quad (4)$$

y el coeficiente que caracteriza el grado de linealidad:

$$R^2 = 0.9995. \quad (5)$$

Es posible ejercitar el cálculo de incertidumbres en la relación carga-masa a partir de la incertidumbre en la pendiente debida a las resoluciones de la tensión y las coordenadas en pantalla.

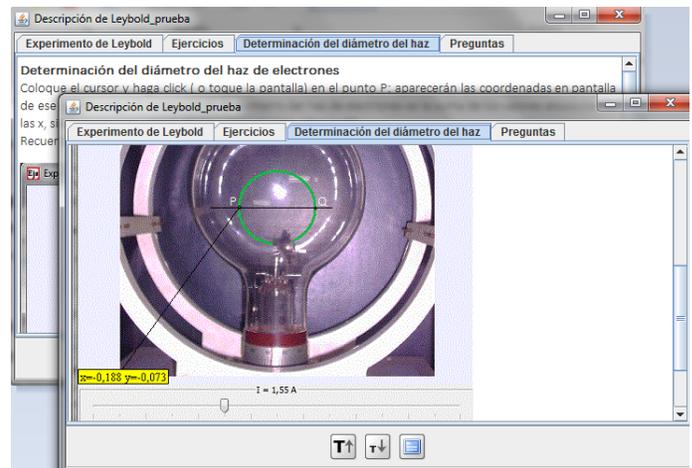


Figura 3. Determinación del diámetro del haz de electrones.

La ventana de descripción incluye una lista de preguntas que pueden ayudar al estudiante en el análisis de los resultados y la interpretación de todo el experimento.

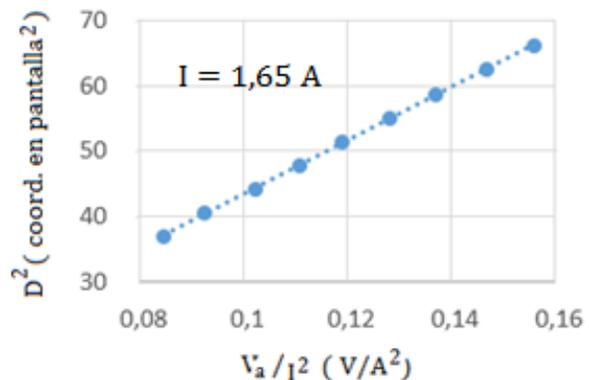


Figura 4. Gráfico de  $D^2$  contra  $\frac{V_a}{I^2}$ .

La simulación en su conjunto es una pequeña unidad de instrucción. Se trata de incentivar el trabajo independiente de los alumnos en la preparación de una práctica de laboratorio [5] o en la aproximación al trabajo experimental si no se cuenta con el equipamiento adecuado. En el caso del experimento descrito la simulación sirve además para prolongar el tiempo de vida limitado de este equipo.

Se hizo un ensayo con dos grupos de estudiantes de 2do año de la carrera de Ingeniería Industrial que cursaban la asignatura Física II. Se coordinó con los alumnos un horario para consultas, al que asistieron sólo 21. El 63,2% de los 57 estudiantes confrontó dificultades a la hora de estudiar independientemente los fundamentos teóricos y las instrucciones de la simulación, lo que se puso de manifiesto en la discusión con el profesor de los resultados del trabajo.

Al final las calificaciones fueron las siguientes: 9 alumnos con 5, 12 con 4, 20 con 3 y 16 con 2. Las notas con 2 o 3 se debieron a la razón expuesta antes sobre la interpretación de

los contenidos. A pesar de eso todos los alumnos calificaron el trabajo de muy interesante.

A continuación se muestra la lista de las preguntas (Fig. 5).

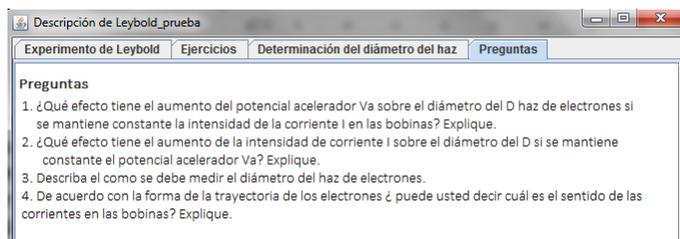


Figura 5. Preguntas para la preparación de los estudiantes.

La simulación sobre el estudio de la radiación térmica es una versión del experimento correspondiente que es parte de los cursos de Física III en nuestro centro.

El experimento (Fig. 6) consiste en medir la iluminación a una cierta distancia fija de un filamento de tungsteno, que se considera un cuerpo gris, por el que circula una corriente eléctrica de intensidad  $i$ . Se hace variar la tensión  $v$  en el filamento y se mide la intensidad de corriente  $i$  a través de él. Para demostrar la expresión de trabajo se toma como punto de partida la ley de Wien ya que se trabaja en la región del espectro visible a temperaturas absolutas cercanas a  $T = 1000$  K.



Figura 6. Montaje experimental. Estudio del fenómeno de la radiación térmica.

El intervalo de las longitudes de onda de trabajo se estrecha mediante un filtro de longitud de onda característica  $\lambda$ . La iluminación  $E$  medida con el luxómetro se expresa en función del poder emisor espectral y la temperatura del filamento se mide a partir de su resistencia:

$$R = \frac{V}{i}, \quad (6)$$

y las expresiones:

$$R = R_0(1 + \alpha t + \beta t^2 + \gamma t^3), \quad (7)$$

despreciando los términos cuadrático y cúbico de  $t$ .

$$R = R_0(1 + \alpha t), \quad (8)$$

$$T(K) = \frac{R - R_0}{\alpha R_0} + 273, \quad (9)$$

donde  $R_0$  es la resistencia del filamento para  $t = 0^\circ\text{C}$ . Se conoce que para el tungsteno  $\alpha = 5.238 \cdot 10^{-30} \text{C}^{-1}$ .

Finalmente se puede obtener la ecuación de trabajo:

$$\ln\left(\frac{E}{E_0}\right) = \frac{hc}{\lambda k} \ln\left(\frac{T - T_0}{TT_0}\right), \quad (10)$$

donde  $E_0$  y  $T_0$  son los valores mínimos en los pares de valores de la iluminación y la temperatura absoluta;  $h$  es la constante de Planck,  $c$  la rapidez de la luz en el vacío y  $k$  la constante de Boltzmann.

La resistencia del filamento a  $t = 0^\circ\text{C}$  es  $R_0 = 2.80 \Omega$  y la longitud de onda característica del filtro es de 520 nm.

Se puede comprobar la linealidad de (10) e incluso calcular la constante  $h$  a partir de los valores de las otras dos.

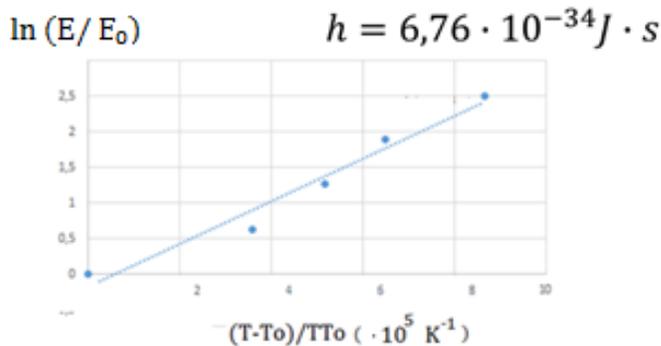


Figura 7. Gráfico de  $\ln\left(\frac{E}{E_0}\right)$  vs  $\ln\left(\frac{T-T_0}{TT_0}\right)$ .

Se obtiene  $h = 6.76 \cdot 10^{-34} \text{Js}$ .

En resumen se da continuidad al trabajo del autor sobre el perfeccionamiento del laboratorio de Física en la Enseñanza Universitaria [6]. Se trata de acercar la simulación al experimento real, no de sustituir el experimento por la simulación.

El trabajo se basa en dos experimentos de laboratorio realizados con el equipamiento proveniente de la República Popular China y que se encuentra en nuestro departamento desde el año 2007.

Se ha partido de fotografías del equipamiento con alguna animación. Los procedimientos para medir e ingresar los valores de los parámetros, así como la determinación del diámetro del haz de electrones en el experimento de Leybold, se han diseñado en lo posible casi igual de laboriosos que en el experimento real, lo que no se consigue en algunas otras simulaciones de Física que hemos visto, donde el peso del trabajo se basa sólo en animaciones.

Se logra la ejercitación del procesamiento matemático de los resultados e incluso se puede hacer lo mismo con la

estimación de las incertidumbres. Las ideas expuestas aquí se recomiendan como la base de los instructivos para los experimentos correspondientes.

#### BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Rodrigues, B. Alves y otros, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **36**, 256 (2019)
- [2] E. Kolhy, D. Carvalho y otros, *Revista Iberoam. de Tecnologías de Aprendizaje, IEEE – RITA*, **10**, 186 (2015)
- [3] F. Esquembre EASY JAVA SIMULATIONS, The Manual for version 3.1, España (<http://fem.um.es/Ejs>).
- [4] W. Sears, M.W. Zemansky, H.D. Young y R.A. Freedman, *Física Universitaria con Física Moderna*, 12<sup>a</sup> edición, Volumen II, (Addison-Wesley, 2009)
- [5] A.D. Rodríguez y J.J. Llovera, *Lat. Am. J. Phys. Educ.* **8**, 4504-1 (2014)
- [6] J. Ortega, M.L. Martínez y L. Jorge, *Lat. Am. J. Phys. Educ.* **13**, 2305-1 (2019)

---

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0, <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) license.



# PROPUESTA DIDÁCTICA PARA LA PROFESIONALIZACIÓN DE LA FÍSICA GENERAL EN LA CARRERA INGENIERÍA CIVIL

## DIDACTIC PROPOSAL FOR THE PROFESSIONALIZATION OF GENERAL PHYSICS IN THE CIVIL ENGINEERING MAJOR

S. L. GONZÁLEZ BELLO<sup>a†</sup>, S. CAMPOS MOVILLA<sup>a</sup>

Departamento de Física, Universidad de Holguín, Cuba; sgonzalez@uho.edu.cu<sup>†</sup>

<sup>†</sup> autor para la correspondencia

Recibido 9/03/2020; Aceptado 27/09/2020

PACS: Physics education (educación en física), 01.40.-d; physics teaching methods (métodos de enseñanza de la física), 01.40.gb; physics organizational activities (actividades organizacionales en física), 01.10.Hx

La carrera Ingeniería Civil en Cuba, forma profesionales con conocimientos y posibilidades de aplicación de las ciencias básicas y de la ingeniería, para proponer soluciones enfocadas en las edificaciones, las estructuras y las vías terrestres de comunicación [1].

En el Plan de Estudio "E", la Física provee al estudiante de conocimientos, habilidades y valores, para resolver problemas profesionales, que son determinantes en la adquisición de los modos de actuación profesional del ingeniero civil [1].

La práctica educativa en la Universidad de Holguín, reveló insuficiencias en la enseñanza de la Física para Ingeniería Civil: La inadecuada selección de conocimientos, e insuficiente vinculación de los ejercicios y problemas, con las disciplinas propias, lo que limita la formación profesional de los estudiantes.

Se encontraron publicaciones sobre dificultades para relacionar la Física con asignaturas de ingeniería, la solución de problemas profesionales, y la profesionalización en Ingeniería Civil, Mecánica e Industrial [2-7]. Se aprecia la necesidad de perfeccionar la didáctica de la Física, según las exigencias del Plan "E".

En este artículo se presenta una propuesta didáctica, que se distingue por la selección de conocimientos afines a la Ingeniería Civil, y la vinculación de las clases prácticas con problemas profesionales, para contribuir a la profesionalización de la Física.

Se complementan dos tendencias de la didáctica de la Física: la fundamentalización y la profesionalización [6,7]. La primera va a los fundamentos como ciencia básica, la segunda a la adaptación a los problemas profesionales del futuro ingeniero.

La primera contribución es la selección de conocimientos físicos afines a los problemas profesionales del ingeniero civil [1,8], que serán ejemplificados en las conferencias:

Topografía (Unidades de medida empleadas en Topografía), Geotecnia (Ley de Hooke), Análisis y Diseño de estructuras (Estática), y Diseño geométrico de obras viales (Dinámica del movimiento circular).

Los conocimientos seleccionados, enriquecen la Disciplina Principal Integradora de la carrera, que desarrolla habilidades en los estudiantes, y modela sus modos de actuación profesional.

La segunda contribución en este artículo, es la inclusión de ejercicios y problemas en las clases prácticas, que se relacionen con problemas profesionales en: El diseño geométrico de obras viales, vigas apoyadas en los extremos y puentes suspendidos, dilatación térmica en autopistas y vías férreas.

Para la ejemplificación didáctica se utiliza la dinámica del movimiento circular, en la solución del problema profesional del trazado de carreteras, y vías férreas en curva.

Se discute la explicación física del movimiento de un vehículo en una curva, debido a las fuerzas actuantes sobre el mismo y se escogen casos notables, para el análisis:

- a) El diseño de una vía con curva plana.
- b) La velocidad máxima de un auto, en una curva peraltada.
- c) Si la velocidad de operación es mayor que la velocidad máxima.
- d) Si la velocidad de operación, es menor que la velocidad máxima.

La recomendación didáctica es que hay que determinar las ecuaciones del movimiento del vehículo en la curva, utilizando un diagrama de cuerpo libre (DCL).

Los casos a) y b) se analizan en [9]. En a) no hay peralte, y la fuerza de fricción estática proporciona la fuerza centrípeta necesaria para que el auto tome la curva. Si la fuerza centrípeta se iguala a la fuerza de fricción estática máxima  $f_{S,max} = \mu_s n$ , la velocidad máxima del auto será:

$$v_{max} = \sqrt{\mu_s g R}. \quad (1)$$

En b) la curva posee peralte y la fuerza de fricción tiene una componente hacia el centro y otra hacia abajo. La normal tiene una componente hacia arriba y otra hacia el centro, que

contribuye con la componente de la fuerza de fricción, a lograr la fuerza centrípeta necesaria.

El ángulo de peralte  $\beta$ , será:

$$\beta = \arctan\left(\frac{v^2}{Rg}\right), \quad (2)$$

quedando en función de la velocidad  $v$  y el radio  $R$  de la curva [9].

Los casos c) y d), son menos analizados con los estudiantes, pero son típicos en el diseño de obras viales. Un problema que recoge ambos casos, se propone en [9], y se toma para su solución:

Considere una carretera húmeda peraltada, donde hay un coeficiente de fricción estática de 0,30 y un coeficiente de fricción cinética de 0,25 entre los neumáticos y el pavimento. El radio de la curva es  $R = 50$  m.

a) Si el ángulo de peralte es  $\beta = 25^\circ$ , ¿qué velocidad máxima puede alcanzar un auto antes de deslizar hacia arriba por el peralte?, b) ¿Qué rapidez mínima tendrá para no deslizar hacia abajo por el peralte?

Se identifican los datos:  $\mu_s = 0.30$ ;  $\mu_k = 0.25$ ;  $R = 50.0$  m y  $\beta = 25^\circ$  y las incógnitas: a)  $v_{max} = ?$ ; b)  $v_{min} = ?$

El auto se mueve con aceleración  $a = a_c$ , dirigida al centro de curvatura, situado a la derecha en el DCL (Fig. 1). La  $a_c$  se calculará de las fuerzas actuantes, y la velocidad de la ecuación (3):

$$a_c = \frac{v^2}{R}.$$

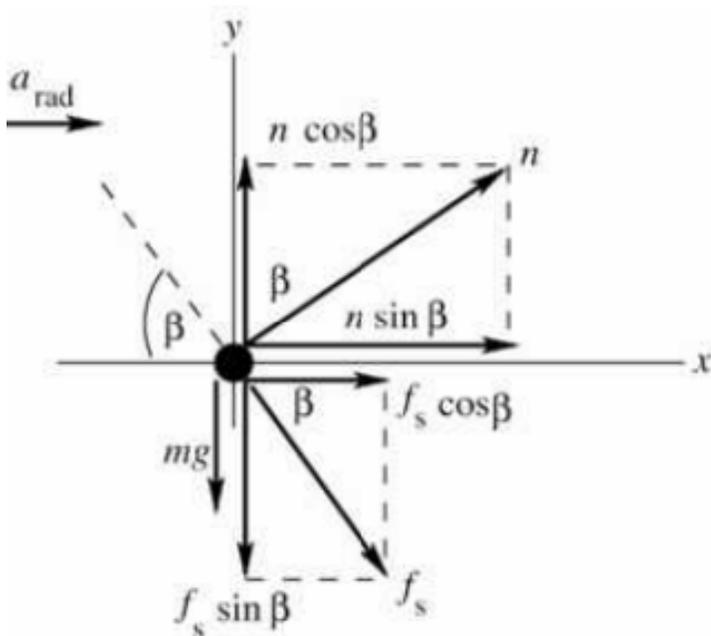


Figura 1. Representación de las fuerzas actuantes. Fuente: Young, H.D. y Freedman, R.A. Física universitaria. Solucionario. Volumen 1. 13ª edición. PEARSON. México, 2013. p.193.

a) En esta situación, la fuerza de fricción estática apuntará hacia abajo, formando un ángulo  $\beta$  con la horizontal, y tendrá un valor máximo  $f_{s_{max}} = \mu_s n$ .

En un marco de referencia inercial, se aplica la segunda ley de Newton para obtener las ecuaciones del movimiento del auto en la curva:

$$\sum F_x = ma_x, \quad (4)$$

$$n(\sin \beta + \mu_s \cos \beta) = ma_c,$$

$$\sum F_y = ma_y, \quad (5)$$

$$n(\cos \beta - \mu_s \sin \beta) = mg.$$

Resolviendo las ecuaciones, se obtiene:

$$a_c = \left(\frac{\sin \beta + \mu_s \cos \beta}{\cos \beta - \mu_s \sin \beta}\right)g. \quad (6)$$

Se calcula  $a_c = 8,82$  m/s<sup>2</sup>, y se obtiene la velocidad máxima:

$$v_{max} = \sqrt{a_c R} = 21 \text{ m/s}.$$

b) Para que el auto no deslice hacia abajo, la fuerza de fricción estática tendrá sentido contrario al anterior, y el DCL es idéntico al mostrado en a), excepto en que las componentes de la fuerza de fricción tienen sentidos opuestos. En las ecuaciones del movimiento los términos que contienen  $\mu_s$ , tienen signos opuestos.

Despejando  $a_c$  y calculando:

$$a_c = \left(\frac{\sin \beta - \mu_s \cos \beta}{\cos \beta + \mu_s \sin \beta}\right)g. \quad (7)$$

(3) Se obtiene que  $a_c = 1,47$  m/s<sup>2</sup> y la velocidad mínima  $v_{min} = \sqrt{a_c R} = 8,6$  m/s.

En ese rango de velocidades, el auto toma la curva con velocidad constante, siempre que la fuerza de fricción estática sea menor que  $\mu_s n$ . Cuando  $\mu_s \leftarrow 0$ ,  $a_c = g \tan \beta$ .

Se recomienda hacer un análisis similar de ejercicios y problemas, en clases prácticas que se relacionen con problemas profesionales de Ingeniería Civil.

La propuesta didáctica se aplicó en primer año de Ingeniería Civil, en el curso escolar 2018-19. Se realizó un experimento pedagógico, en un universo de dos grupos naturales con 30 estudiantes cada uno.

Se seleccionó una muestra de un grupo experimental (GE) y uno de control (GC), de 10 estudiantes cada uno (33,3% del universo), seleccionados aleatoriamente. Las condiciones de la muestra fueron equivalentes en cuanto a: promedio de notas en el primer semestre (3,20), composición por sexos (6 varones y 4 hembras) y promedio de edades (18,9 años).

En cada prueba parcial y examen final, se incluyó una pregunta relacionada con alguno de los problemas profesionales específicos de la carrera. Para analizar los resultados obtenidos en el aprendizaje, se tomó el promedio de notas de las dos pruebas parciales y el examen final de semestre, de cada estudiante de la muestra, y del grupo.

Se compararon los promedios del GE con los del GC, además se compararon los promedios de ambos grupos con las notas obtenidas en cursos anteriores.

El promedio del GC fue de 3,3 y del GE de 3,9; superior en +0,6. En los dos cursos anteriores, el promedio de notas global fue de 3,1 y 3,2, respectivamente. La comparación, permite afirmar que los resultados del aprendizaje en el GE, son superiores al GC, y ambos grupos mejoran con respecto a cursos anteriores.

Se evidenció en las respuestas, dominio de elementos esenciales del conocimiento, y habilidades en la solución de los ejercicios propuestos. Se apreció mayor interés en las clases de Física al relacionarlas con los problemas profesionales de su carrera.

Se recomienda perfeccionar la actividad experimental con enfoque de profesionalización, e incorporar conocimientos de Física Moderna, que no tiene el programa actual de la disciplina.

#### BIBLIOGRAFÍA

[1] Cuba. MES. Plan de Estudio "E". Carrera Ingeniería Civil. La Habana, (2018), pp. 8-50.

- [2] C. Gutiérrez y M. Reynolds, *Rev. Latin. Hist. Cien. Tec.* **16**, 63 (2014).
- [3] G. Tanamachi Castro y M. de la Paz Ramos Lara, *Rev. Mex. Inv. Edu.* **20**, 557 (2015).
- [4] M. Pérez, M. Legañoa y D. Travieso, *Rev. Ingenierías*, **III**, 37 (2000).
- [5] C. A. Osaba Rodríguez y L. Ruqué Álvarez, *Lat. Am. J. Phys. Educ.* **9**, 4403-1 (2015).
- [6] L. O. Mora Aguilera, "Sistema de saberes para el enfoque de profesionalización de la Física en la carrera de Ingeniería Industrial". Tesis de doctorado, Universidad de Holguín, Holguín, 2014.
- [7] Y. Acosta Gómez y F. O. Machín Armas, *Rev. Atlante: Cuad. Educ. Des.* **5**, 25 (2016).
- [8] J. P. Fiallo Rodríguez, *La interdisciplinariedad en la escuela*, (ICCP, La Habana, 2001), pp. 34-36.
- [9] H.D. Young y R.A. Freedman, *Física universitaria*, Volumen 1. 13ra Ed. (PEARSON, México, 2013). pp. 156-172.

---

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0, <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) license.



# PROBLEMAS INTEGRADORES Y CONTEXTUALIZADOS COMO VÍA PARA LA COMPRENSIÓN DE LOS PRINCIPIOS Y LEYES FÍSICAS

## INTEGRATING AND CONTEXTUALIZED PROBLEMS AS A WAY TO UNDERSTAND THE PRINCIPLES AND LAWS OF PHYSICS

J. J. FIGUEREDO<sup>a†</sup>, C. MORALES<sup>a</sup>

Facultad de Informática y Ciencias Exactas, Universidad de Camagüey, Cuba; juan.figueredo@reduc.edu.cu<sup>†</sup>

<sup>†</sup> autor para la correspondencia

Recibido 9/03/2020; Aceptado 27/09/2020

PACS: General physics (física general), 01.55.+b; Teaching methods and strategies (métodos y estrategias de enseñanza), 01.40.gb; Learning theory and science teaching (teoría de aprendizaje y ciencia de la enseñanza), 01.40.Ha

En la actualidad existe la necesidad de incrementar la calidad de las clases, acercándolas a la práctica del profesional en formación. Una vía para alcanzar este propósito consiste en la utilización de problemas integradores y contextualizados [1], que contribuyan al aprendizaje significativo [2].

Un problema integrador es una situación socioeducativa que, para ser resuelta, reúne todos los elementos esenciales del contenido de una o varias asignaturas a través de la aplicación del método científico [3].

Algunos autores sugieren el uso de simulaciones virtuales como apoyo a la solución de los problemas, vinculándolos con las prácticas de laboratorio [4,5].

Para una mejor comprensión de los principios y leyes de la Física, los autores brindan una alternativa metodológica para resolver problemas integradores y contextualizados, que consta de cinco etapas.

### Primera etapa: Lectura y comprensión.

En este momento el estudiante debe familiarizarse con el problema. Se deben identificar las incógnitas para luego extraer aquella información relevante, cualitativa y cuantitativa que aparezca explícita e implícitamente en el enunciado. Es conveniente auxiliarse de esquemas que ilustren la situación.

### Segunda etapa: Elaboración de una estrategia para buscar la solución.

A partir de los datos e incógnitas, se procede a reflexionar sobre cuáles son los elementos del conocimiento que se deben vincular y cómo organizar su utilización, ordenando los pasos a seguir hacia la solución del problema. Es importante la identificación y clarificación de los conceptos involucrados.

Se recomienda utilizar simulaciones virtuales que recreen la realidad planteada, así como otras tecnologías informáticas en el proceso de enseñanza-aprendizaje de la Física.

Según la complejidad del problema se pueden elaborar "preguntas de apoyo", cuyas respuestas tributen al problema principal.

### Tercera etapa: Ejecución de la estrategia.

Se pone en práctica la estrategia según el plan de solución elaborado, la que deberá ser flexible, no regida por un método invariante de ejecución. Su carácter debe posibilitar cambios durante el transcurso de la actividad, sin dejar de cuidar los buenos hábitos de pensamiento y análisis lógico.

### Cuarta etapa: Análisis de los resultados.

Es necesario comprobar que se ha dado respuesta a la incógnita planteada, leyendo nuevamente el enunciado del problema y analizando críticamente el proceso de solución y sus resultados, precisando si éstos últimos son lógicamente correctos, tanto numérica como dimensionalmente.

### Quinta etapa: Cambiar la visión del problema.

Valorar qué otras vías de solución se pueden utilizar para obtener el mismo resultado, cuál es la relación del problema con la profesión, y cómo varían las magnitudes relacionadas unas respecto a otras.

En la mayoría de los casos, la solución de los problemas comprende aspectos netamente instructivos para otorgar al profesional en formación herramientas necesarias para mejorar su desempeño futuro. Sin embargo, en esta etapa, dirigida por el docente, se propone resaltar la educación como forma de potenciar la adquisición y fortalecimiento de buenas costumbres, valores y hábitos para con la sociedad.

A continuación, se expone la manera en que fueron aplicadas las ideas expuestas anteriormente en una clase práctica de Física para la carrera de Ingeniería Eléctrica relacionada con el estudio de la potencia eléctrica. En este ejemplo se ilustran las relaciones intradisciplinarias al integrar conocimientos de electromagnetismo y de termodinámica.

**Problema:** En una planta metalúrgica se rompe uno de los 20 hornos eléctricos idénticos que se utilizan para fundir plomo, y es sustituido por otro cuya potencia eléctrica es de 670 W. Conociendo que el horno descompuesto, con un 85 % de rendimiento, era capaz de fundir en un lapso de 15 min el 70 % de una pieza de 25 kg a una temperatura inicial de 25 °C,

¿se podrá con el nuevo horno cumplir la demanda existente anteriormente?

Para cumplir con la demanda actual la potencia eléctrica del nuevo horno debe ser igual o mayor que la del horno descompuesto, de ahí que el objetivo consiste en obtener el valor de la potencia eléctrica de este último, para compararla con la del horno de repuesto.

Se puede representar el balance energético de este equipo como se muestra en la Fig. 1, donde la cantidad de energía eléctrica disipada en forma de calor ( $Q$ ), en un tiempo dado, se corresponde con la cantidad de calor tomado del foco caliente, una parte del cual ( $Q_{util}$ ) es utilizado para calentar la pieza de plomo hasta fundir el 70 % de ella, mientras que cede calor a los alrededores debido a las pérdidas que ocurren por diferentes vías.

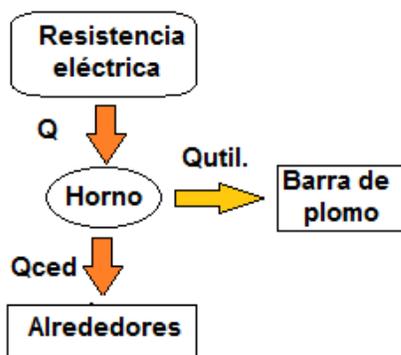


Figura 1. Representación del balance energético en el horno.

Dada la relativa complejidad del problema se elaboran algunas preguntas de apoyo:

1. ¿Qué relación existe entre la potencia eléctrica y la cantidad de energía que se disipa en forma de calor en un tiempo dado?
2. ¿Cómo se relacionan entre sí las magnitudes que aparecen en la simulación?
3. ¿Cómo determinar el trabajo termodinámico neto que se realiza en el proceso?

La estrategia de solución se orienta hacia el cálculo de la potencia del horno averiado, a partir de la expresión:

$$P = \frac{Q}{t}. \quad (1)$$

Donde se relaciona con el rendimiento del horno y el calor utilizado:

$$\eta = \frac{Q_{util}}{Q}, \quad (2)$$

de donde se tiene que:

$$Q = \frac{Q_{util}}{\eta}. \quad (3)$$

En este momento se procede a calcular la cantidad de calor utilizada para fundir parte de la barra de plomo.

Si se designa como  $Q_C$  la cantidad de calor necesaria para calentar la pieza de plomo hasta la temperatura de fusión y como la necesaria para fundir el 70 % de su masa, entonces:

$$Q_{util} = Q_C + Q_F, \quad (4)$$

donde

$$Q_C = cm(T_f - T_0), \quad Q_F = \alpha m \lambda_f. \quad (5)$$

De este modo, la potencia eléctrica del horno se obtiene por la expresión:

$$P = m \frac{c(T_f - T_0) + \alpha \lambda_f}{\eta t}. \quad (6)$$

Sustituyendo y calculando, se tiene que:

$$P \approx 1845W$$

El nuevo horno tiene una potencia inferior a la del horno averiado. Este resultado permite concluir que no será posible cumplir con la demanda.

Como contribución a la educación ambiental se solicita a los estudiantes que determinen el consumo de fueloil en una jornada laboral y que valoren su impacto en el medio ambiente.

Para ello se sugiere consultar el Anuario Estadístico de Cuba. Minería y Energía, en <http://www.onei.gob.cu/node/14902> [6].

Teniendo en cuenta que son 20 hornos eléctricos idénticos y considerando un consumo específico de 276,1 g/kWh, el consumo de todos ellos en el tiempo considerado es de 9225 kWh, por lo que en un día laboral de 8 h alcanzaría un valor de 295,2 kWh, lo cual equivale a 81,5 kg de fueloil.

La combustión de este combustible implica la emisión de, aproximadamente, 244,5 kg de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, si se considera que por cada kilogramo de combustible que se quema se emiten 3 kg de CO<sub>2</sub>.

Este gas tributa al incremento del efecto invernadero y, de hecho, al calentamiento global.

A continuación, se presentan tres problemas integradores, contextualizados respectivamente a las carreras de las ingenierías Química, Civil y Mecánica:

1. Durante la electrólisis de una solución de ácido sulfúrico con resistencia de 0,4  $\Omega$  se utilizó una potencia de 35 W para calentar el electrolito. ¿Qué volumen de hidrógeno se desprendió en un lapso de 50 min?
2. Se desea construir un edificio con una altura de 370 m, teniendo un coeficiente de seguridad igual a 8. ¿Podrá utilizarse ladrillo como material para la construcción, conociendo que su límite de rotura a la compresión es 6·10<sup>7</sup> Pa?
3. En un almacén existen 320 alambres de acero con un diámetro de 1 mm, con los cuales se desea construir un cable para levantar uniformemente una carga de 2 t, con un coeficiente de seguridad igual a 10. Conociendo que el límite de rotura del acero es de 5,8·10<sup>8</sup> Pa, ¿es suficiente la cantidad de alambres existentes para cumplir el objetivo?

Resulta impostergable transformar la concepción del proceso de enseñanza aprendizaje de la Física, particularmente las clases prácticas, que son el espacio fundamental para controlar y dirigir el desempeño de los estudiantes.

Con esta alternativa metodológica, los autores han pretendido brindar a los estudiantes de ingeniería una herramienta que contribuya al desarrollo de un aprendizaje significativo. Sin embargo, es necesario tener en cuenta también el interés y actitud de estos para con el proceso de su formación profesional.

#### BIBLIOGRAFÍA

[1] J. A. Romero, M. Alvarado y J. Olivares, Revista electrónica ANFEI Digital [ISSN: 2395-9878], 2, 4, (2016)

(<https://www.anfei.mx/revista/index.php/revista>).

- [2] Z. Gangoso. Revista de Enseñanza de la Física, Vol.12 No 2, pp 5-21, (1999).
- [3] E. K. Encarnación. "Metodología para el microdiseño curricular de la interdisciplina de física basada en problemas integradores para las carreras de ingenierías de UNAPEC", Cuarta Conferencia Internacional Latinoamericana y Caribeña para Ingeniería y Tecnología, Mayaguez, Puerto Rico (2006).
- [4] F. J. Parra Bermúdez, R. Ávila. Lat. Am. J. Phys. Educ. **11**, 2 (2017).
- [5] C. Álvarez, R. Ortiz. Rev. Cubana Fis. **28**, 1 (2011).
- [6] Oficina Nacional de Estadística e Información. Anuario Estadístico de Cuba. Minería y Energía, (2018) (<http://www.onei.gob.cu/node/14902>).

---

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0, <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) license.



# PERCEPCIÓN DE LA CIENCIA Y CULTURA CIENTÍFICA: LA FÍSICA INCLUIDA

## SCIENCE PERCEPTION AND SCIENTIFIC CULTURE: PHYSICS INCLUDED

D. DE J ALAMINO<sup>a†</sup> Y Y. AGUILAR<sup>a</sup>

Centro Universitario "Enrique Rodríguez-Loeches Fernández", Universidad de Matanzas, Cuba; diego.alamio@umcc.cu<sup>†</sup>

<sup>†</sup> autor para la correspondencia

Recibido 9/03/2020; Aceptado 27/09/2020

PACS: History of science (Historia de la ciencia), 01.65.+g, science in school (ciencia en la escuela), 01.40.E-, science and society (ciencia y sociedad), 01.75.+m

La Conferencia Mundial; La Ciencia para el siglo XXI exhortó a: fomentar y difundir los conocimientos científicos básicos en todas las culturas y todos los sectores de la sociedad [1]. La Oficina Regional de Educación para América Latina y el Caribe de la UNESCO publicó un documento titulado: "Cómo promover el interés por la cultura científica" [2]. Contrastando con lo anterior continúan haciéndose reportes de la presencia de analfabetismo científico [3,4] y carencia de cultura científica [5,6].

La locución "cultura científica", ha necesitado del transcurso del tiempo para su conceptualización; en 1959 la Conferencia de C. P. Snow "The Two Cultures and the Scientific Revolution" [7], suscitó la atención del asunto. Operacionalmente puede entenderse cultura científica como el conjunto de conocimientos, valoraciones, actitudes, comportamientos y prácticas que los ciudadanos han desarrollado como respuesta a los avances de la ciencia y la tecnología.

La preocupación por medir los conocimientos, los intereses y las actitudes de la sociedad hacia la ciencia se remontan a 1979, con el inicio de las Survey Understanding of Science and Technology [8].

Atendiendo esta problemática, los autores se han propuesto explorar, en el entorno más inmediato con el que interactúan, el estado de la cultura científica, siguiendo una posición holística, aunque se reconoce la inclinación hacia la física; en razón de estudiar la física, dentro del concierto de las ciencias, el movimiento en su concepción más elemental [9].

Se realizaron encuestas a estudiantes de Agronomía, Medicina y a profesores de escuelas de la enseñanza media y a todos los profesores de Física del Municipio Jagüey Grande. Los ítems de las encuestas se formularon como afirmaciones que involucran contenidos y conceptos de la ciencia, acerca de la ciencia y del método científico.

Uno de los instrumentos aplicados se muestra con sus resultados en la Tabla 1 y se puede apreciar que en cuanto al contenido, los ítems están estrechamente relacionados con la Física, al explorarse acerca del concepto de átomo, efectos de la luz como la fotosíntesis y la conversión fotovoltaica, la ley

de conservación y transformación de la energía, la gravitación y la Astrología.

El resultado global de respuestas satisfactoria es bajo (54.0%). En cuanto a los ítems hay resultados que en asuntos esenciales como el método científico y la transformación energética dejan insatisfacciones, al igual que el surgimiento del concepto de átomo e identificar a la Astrología como ciencia.

A estudiantes de Agronomía y Medicina se les aplicó una encuesta similar a la anterior pero con algunas preguntas atemperadas a su contexto. Los resultados no se diferencian apreciablemente de los obtenidos por los profesores; el 57.14 % de respuestas correctas en tercer año de Medicina y en Agronomía el primer año obtuvo 40.33 % y el segundo 47.25 %.

Tabla 1. Encuesta a profesores de escuelas de la enseñanza media. Afirmación y porcentaje de respuestas correctas en cada ítem.

Afirmaciones	%
1 - El concepto de átomo surgió en la Antigua Grecia.	33.3
2 - Los humanos mataban los dinosaurios para alimentarse.	66.6
3 - En el acceso al conocimiento es más importante el experimento que la razón.	60.0
4 - En los paneles solares se convierte la energía calorífica del Sol en electricidad.	13.3
5 - Sin la fotosíntesis las plantas no podrían vivir.	86.6
6 - La Edad Media resultó una etapa en que se retrasó el avance de la ciencia.	36.3
7 - La Astrología es una ciencia que permite predecir el futuro.	53.3
8 - No se ha encontrado un hecho que niegue la ley de conservación y transformación de la energía.	66.6
9 - Las mareas se deben a la influencia del Sol sobre la Tierra.	53.3
7 - El oro es un elemento de la tabla periódica de Mendeleiev.	100
Escuela A: 56.66 % B: 51,11 % C: 54.00 %	54.0

Para los profesores de Física se elaboró un instrumento especialmente diseñado con 24 afirmaciones a las cuales el

encuestado podía responder afirmativa o negativamente y se le daba también la opción intermedia: “a veces”.

Las aseveraciones en este caso no estuvieron dirigidas a los contenidos específicos de la física, teniendo en cuenta que por su función los docentes están relacionados con la asignatura.

Como lo que se quiere explorar es el conocimiento que tienen los docentes de las reconocidas potencialidades culturales de la física [10,11], su relación con la naturaleza de la ciencia y el método científico, hay ítems de la encuesta dirigidos a medir la preparación en cuanto a la integración de la historia y la epistemología de la física en la enseñanza de la Física, lo cual ha sido fundamentado como proceder didáctico para el logro de la comprensión cultural de la física [12,13].

La Tabla 2 muestra los ítems más significativos de la encuesta realizada a los profesores de física y los resultados obtenidos; la categoría “a veces” se infiere.

Tabla 2. Resultados de la encuesta a profesores de Física.

Aspectos a considerar	% Si %No
1- La ciencia surge de la obtención del conocimiento mediante la observación de patrones regulares, de razonamientos y de experimentación en ámbitos específicos, a partir de los cuales se generan preguntas.	23 53.8
2-Al estudiar un caso real a través de un modelo como el de gas ideal estamos en presencia de uno de los métodos del trabajo científico.	23 38.2
3-Los científicos necesitan, imprescindiblemente, partir de la experimentación para obtener resultados en la ciencia.	100 0
4-No es posible introducir la historia de la física en la clase de física pues no se puede cumplir entonces con el programa de la asignatura.	53.8 23.0
5-No me siento preparado para introducir la historia de la física en las clases, por el conocimiento de la historia de la física que poseo	100 0
6-Los estudiantes conocerán no solo conceptos, leyes, si no la evolución de la física y se mejoraría el aprendizaje de esta ciencia si se introduce la historia de la física en las clases de Física.	100 0
7-Me gustaría realizar en las clases de física menos problemas y poder explicar mejor las teorías y los procesos mediante los cuales se obtienen resultados importantes por vía experimental.	100 0
8-Si hay teorías que tengo que explicar en clase y tengo dudas de cómo fueron obtenidas simplemente las presento aunque no pueda argumentar sobre ellas.	61.5 0
9-Si logro relacionar los conceptos y teorías con sus procesos de obtención aprecio que los estudiantes asimilan mejor la física y se motivan por ella.	76.9 0
10-Insisto mucho en clase para que los estudiantes se apropien de los procedimientos a través de los cuáles se resuelven los problemas, que después serán objeto de evaluación.	69.2 0
11-Ha oído usted mencionar la palabra Epistemología.	0 84.6

Como resultado general se aprecia que los profesores de Física encuestados, tienen insuficiente dominio sobre aspectos esenciales acerca de cómo la ciencia procede para llegar a nuevos peldaños en el conocimiento de la naturaleza,

menos del 50 % reconoce al método científico como el método de investigación usado principalmente en la producción de conocimiento en las ciencias.

Se constató además que existe escaso conocimiento de historia de la física y el 84.61 % no conocen lo que significa el término epistemología.

Teniendo en cuenta los resultados del trabajo exploratorio se diseñaron cursos para contribuir a mitigar las carencias detectadas y promover la cultura científica a partir del conocimiento de la epistemología y la historia de la ciencia, en particular de la física, ejemplos de estos cursos son:

- Educación y Cultura Científica
- Formación de la Educación y la Cultura Científica desde la escuela
- Historia, Filosofía y Metodología del Conocimiento Científico
- Historia y epistemología de la física
- La Física su historia y contemporaneidad: de la gravitación a los quarks

Los objetivos de los cursos están orientados a: fomentar el conocimiento de la ciencia y la cultura científica, diferenciar entre lo que es ciencia y lo que no lo es, asumiendo una posición crítica basada en los rasgos distintivos del método científico, argumentar sobre momentos relevantes del desarrollo científico, a través del conocimiento de sus rasgos esenciales, asumiendo una sólida posición filosófica y ética.

Para el caso de los profesores de Física, lo anterior se concreta en analizar la evolución de las ideas acerca del origen y significado de los conceptos y teorías de la Física.

De este modo el curso: La Física su historia y contemporaneidad: de la gravitación a los quarks, abordó con un enfoque histórico y epistemológico temas tales como: La gravitación y las leyes de Newton, La entropía, Las ecuaciones de Maxwell, La Teoría Especial de la Relatividad, La Mecánica Cuántica, La Electrodinámica Cuántica, La Estadística Cuántica y Las cuatro fuerzas y la unificación.

Los cursos han sido impartidos con la característica de postgrado a profesionales de diferentes sectores y en particular a docentes de Física en la Universidad de Matanzas y en Jagüey Grande.

A manera de conclusión se ha podido detectar en primera aproximación que la carencia de cultura científica no es ajena al entorno de estudiantes universitarios y docentes de la enseñanza media. Existe escasa preparación de los docentes para fomentar la cultura científica, por lo que se necesita del desarrollo de cursos acerca de cultura científica que involucren la historia y la epistemología de la ciencia.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] UNESCO, Conferencia Mundial sobre la ciencia; La Ciencia para el siglo XXI. Hungría (2020) ([unesdoc.unesco.org/image/0012/001229/12298so.pdf](https://unesdoc.unesco.org/image/0012/001229/12298so.pdf)).

- [2] Oficina Regional de Educación para América Latina y el Caribe de la UNESCO, (2005) (<http://www.oei.es/decada/libro.htm>).
- [3] M. Cerejido, La ciencia como calamidad. Un ensayo sobre el analfabetismo científico y sus efectos. Gedisa, (2009).
- [4] S. Rivera-Vargas y J. Espinoza-Zavala, Analfabetismo científico como consecuencia de la falta de divulgación científica 11° Encuentro Institucional y 4° Interinstitucional de Tutorías IPN México (2016), pp. 44-49.
- [5] A. Ferrer y G. León, Cultura científica y comunicación de la ciencia. Razón y Palabra, (2018). ([www.razonypalabra.org.mx/N/n65/actual/aferrer\\_gleon.html](http://www.razonypalabra.org.mx/N/n65/actual/aferrer_gleon.html)).
- [6] J.M. do Carmo, Rev. Anales de la Academia de Ciencias de Cuba **5**, 2 (2015).
- [7] C. P. Snow, The Rede Lectures 1959, (Cambridge University Press, New York, 1961).
- [8] A.M. van den Eynde y E.H. Lopera, La Percepción Social de la Ciencia, (Catarata, Madrid, 2014), pp. 25-29.
- [9] F. Engels, Dialéctica de la Naturaleza, (Editora Política, La Habana, 1979).
- [10] F. A. Horta Rangel y A. González Arias, Rev. Cubana Fis. **29**, 62 (2012).
- [11] I. Galili, Education **20**, 1 (2012).
- [12] Y. Aguilar, "La integración de la historia y la epistemología en el Proceso de Enseñanza Aprendizaje de la Física en el Educación Preuniversitaria", Tesis de doctorado, Universidad de Matanzas, 2019.
- [13] M. A Rivero y H.R Rivero, Infociencia **23**, 71 (2019).

---

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0, <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) license.



# PRÁCTICA DE LABORATORIO DE FÍSICA EN LA CARRERA DE TÉCNICO SUPERIOR DE BIOFÍSICA MÉDICA

## PHYSICS LABORATORY PRACTICE FOR MEDICAL BIOPHYSICS SENIOR TECHNICIANS

A. TORRES<sup>a†</sup>, T. ESPINOZA<sup>b</sup> Y J. MONDÉJAR<sup>b</sup>

a) Facultad de Ciencias Médicas, Universidad de Ciencias Médicas de Matanzas, Matanzas, Cuba; alexanderth.mtz@infomed.sld.cu<sup>†</sup>

b) Facultad de Educación, Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos", Matanzas, Cuba.

† autor para la correspondencia

Recibido 9/03/2020; Aceptado 27/09/2020

PACS: Physics Education (enseñanza de la física), 01.40.-d; computers in education (computadoras en la enseñanza), 01.50.H-; laboratory computer use (uso de computadoras en laboratorios), 01.50.Lc

La carrera de ciclo corto de Técnico Superior en Biofísica Médica, inició en el curso 2019-2020 en la Universidad de Ciencias Médicas de Matanzas de acuerdo a las necesidades del sistema de salud de contar con un profesional graduado en menor tiempo y preparado para realizar actividades de diagnóstico y tratamiento de neoplasias malignas y benignas [1].

Dos de las asignaturas básicas que contribuyen a la formación de estos futuros profesionales son la Física Aplicada y la Física de las Radiaciones, en estas se plantea la necesidad de realizar prácticas de laboratorio [2,3] sin embargo, en las instituciones docentes de salud no se cuenta con una infraestructura para realizarlas y en las orientaciones metodológicas no se proponen vías para lograrlas.

Se propone una alternativa para realizar prácticas de laboratorio de Física en la carrera de ciclo corto de Técnico Superior de Biofísica Médica empleando recursos tecnológicos virtuales. Se muestra un ejemplo y se plantean los aspectos metodológicos para su desarrollo.

Si bien es cierto, que las actividades experimentales que realizan profesores y estudiantes en los laboratorios de Física constituyen la fuente principal que propicia el desarrollo de habilidades experimentales y que se coincide con Horta y González [4] en que el experimento físico no puede ser sustituido por una herramienta informática, es posible contribuir a desarrollar algunas acciones que forman parte de estas mediante simulaciones virtuales como una alternativa en el caso en que no existan los recursos necesarios y de esta manera favorecer el aprendizaje de conocimientos físicos [5], la motivación por el estudio de la Física y contribuir a fortalecer en los estudiantes la idea sobre el carácter experimental de la Física y la función que tiene el experimento en la construcción del conocimiento científico.

Aquí se consideran pertinentes las acciones descritas en [6] como parte de las habilidades experimentales, dado que son posibles de lograr con las actividades que se proponen y se ajustan a las acciones que generalmente se realizan en las prácticas de laboratorio.

Entre estas acciones se encuentran: medir indirectamente magnitudes, organizar datos de la observación, organizar en tablas los resultados de la medición, controlar los resultados del experimento, determinar los aspectos esenciales del resultado experimental, establecer criterios de valoración de resultados del experimento, comparar el resultado con el modelo establecido [6].

Otro de los aspectos es que puede contribuir a que los estudiantes desarrollen sus habilidades en el empleo de las Tecnologías del Aprendizaje y el Conocimiento (TAC) en su actividad de estudio y presentación del informe de la práctica.

Las realizaciones de las prácticas de laboratorio propuestas se orientan al terminar la conferencia inicial del tema para el cual se considera poder utilizar las simulaciones virtuales de acuerdo a los objetivos de aprendizaje que se proponen en los programas de las asignaturas. Esta orientación se realiza al finalizar la conferencia con el propósito de que los estudiantes aclaren sus dudas en cuanto a cómo desarrollarán la actividad que realizarán con la herramienta informática.

Un aspecto importante es que se les explica a los estudiantes mediante la puesta en funcionamiento del simulador, el significado de cada uno de los íconos y figuras que aparecen en la herramienta informática, con el propósito de que comprendan el significado y función de estos.

Se brindan y explican los instructivos para desarrollar la actividad, se orienta la bibliografía donde se encuentra la teoría y se entregan orientaciones para la elaboración y discusión del informe. Los instructivos tienen una síntesis de la teoría, además de una breve explicación del experimento virtual, que contiene las ideas sobre la necesidad de conocer los valores específicos de las mediciones simuladas de las magnitudes físicas que son necesarias relacionar en tablas, gráficos y las ecuaciones matemáticas que permiten explicar el fenómeno físico o ley analizada.

El informe escrito contiene los aspectos generales de introducción de no más tres párrafos, en el que se revele la importancia de la práctica de simulación virtual y cuál es el objetivo. Tiene una parte de desarrollo donde se exponen de

manera breve los fundamentos teóricos, otra sección en la que se explica la actividad que realiza, se adiciona la tabulación de los datos y las gráficas, en la que se incluyen las valoraciones de los estudiantes de esos resultados parciales, para ello deben hacer uso de las ecuaciones matemáticas que corresponden para realizar los cálculos necesarios en el caso que lo requiera porque en varios simuladores están implícitas las ecuaciones junto a los resultados finales de los cálculos de las magnitudes. Por último, las conclusiones del informe en el que exponen las ideas generales en cuanto a cómo los resultados revelan la coherencia entre la teoría y la actividad experimental.

Se pueden utilizar diferentes simuladores de fenómenos y experimentos físicos disponibles en una amplia variedad de universidades de diferentes países y sitios web, los cuales se encuentran accesibles de manera gratuita.

Una de las prácticas propuestas para la asignatura Física de las radiaciones es la relacionada con el efecto fotoeléctrico.

Para ello se puede usar el siguiente simulador que forma parte del grupo que ofrece el Ministerio de Educación de Cuba para la enseñanza de la Física en la educación preuniversitaria, este permite variar los datos:

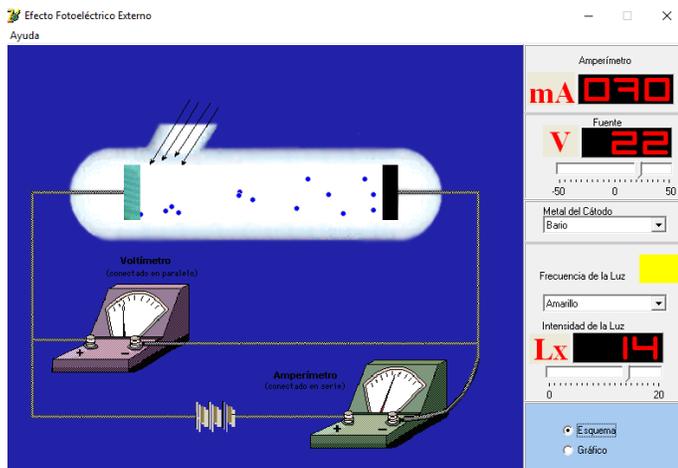


Figura 1. Modelación del efecto fotoeléctrico.

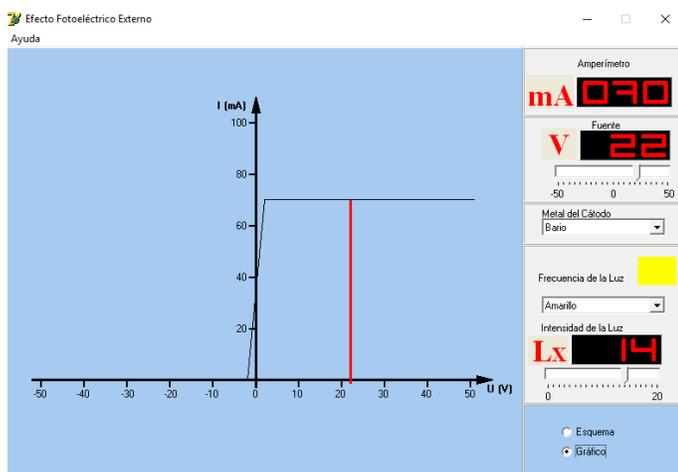


Figura 2. Gráfico del mismo simulador para el efecto fotoeléctrico.

Este simulador permite variar el potencial eléctrico, la intensidad luminosa, la frecuencia de la luz, el tipo de material

del cátodo y ofrece el dato de la fotocorriente. Además, brinda la gráfica que relaciona la fotocorriente con el potencial eléctrico.

Al emplear la simulación es preciso hacer notar que las velocidades de los fotoelectrones se han ralentizado a fin de apreciar su movimiento siendo realmente estas típicamente del orden de  $10^5$  m/s en casi todos los materiales.

Para la realización de esta práctica de laboratorio, con el empleo de esta herramienta informática, los estudiantes introducen varios datos de las magnitudes que permite variar y mediante el uso de esos datos con las ecuaciones principales del efecto fotoeléctrico, pueden determinar los valores de la energía cinética máxima de los fotoelectrones y la función de trabajo.

$$E = \phi + E_{c \max} \quad (1)$$

$$\phi = h\nu - eV_c \quad (2)$$

$$E_{c \max} = h\nu - \phi \quad (3)$$

Es importante señalar que esta experiencia se aplicó con una matrícula de ocho estudiantes, por lo que se indicó que podían realizar antes de la clase la actividad y preparar el informe escrito que deberían defender en el grupo; sin embargo, se les orientó que debían hacer la práctica en el aula en el turno de clases con las computadoras con las que se dispone en la unidad docente y con algunas personales. La finalidad de esta orientación fue lograr un intercambio profesor-estudiantes y también entre ellos, favoreciendo así el cumplimiento de los objetivos en relación con el desarrollo de algunas de las acciones que estructuran las habilidades experimentales.

Por otra parte, se realizaron preguntas a los estudiantes sobre la actividad que realizan y se evaluaron las respuestas, así como la presentación del informe escrito para el cual no debieron utilizar más de 7 minutos.

Este tiempo es suficiente para desarrollar la clase porque pueden emplearse los 44 minutos restantes para introducir la actividad y que los estudiantes modelen la práctica virtual e intercambiar con el profesor sobre la actividad que realizan y lograr realizar las conclusiones de la clase.

A manera de conclusión puede afirmarse que el empleo de las simulaciones virtuales si puede favorecer el desarrollo de algunas acciones que forman parte de las habilidades experimentales en Física.

Las simulaciones virtuales de experimentos y fenómenos físicos constituyen una alternativa para realizar prácticas de laboratorio cuando no se cuenta con la infraestructura necesaria para realizarlas de manera tradicional en los laboratorios de Física.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ministerio de Salud Pública de Cuba, Modelo del profesional del nivel de educación superior de ciclo corto en Biofísica Médica, (2018).
- [2] C. Calderón, Programa de Física Aplicada. Ministerio de Salud Pública de Cuba, (2018).

- [3] C. Calderón, Programa de Física de las Radiaciones. Ministerio de Salud Pública de Cuba, (2018).  
[4] F. A. Horta y A. González, Rev. Cubana Fís. **29**, 2 (2012).  
[5] M. Martínez, Pulso [ISSN: 1577-0338], 34, 183 (2011).  
[6] J. C, Martín, Revista de Educación Mendeive [ISSN: 1815-7696], 16, 2 (2018).

---

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0, <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) license.







