

VIII Taller Iberoamericano de Enseñanza de la Física Universitaria (Tibero)

Octavio Calzadilla
Julio Vidal
(coords.)

VIII Taller Iberoamericano de Enseñanza
de la Física Universitaria (Tibero)

VIII Taller Iberoamericano de Enseñanza de la Física Universitaria (Tibero)

OCTAVIO CALZADILLA



JULIO VIDAL
(coords.)



EDITORIAL

530.113

TaL

T VIII Taller Iberoamericano de Enseñanza de la Física
Universitaria / coordinadores Octavio Calzadilla,
Julio Vidal. -- La Habana: Editorial UH, 2022.
520 p.: gráf., tab.

1. FÍSICA - TALLER IBEROAMERICANO.
2. FÍSICA - ENSEÑANZA UNIVERSITARIA.
- I. Calzadilla, Octavio, 1949- coord.
- II. Vidal, Julio, 1946. coord.

ISBN-e 978-959-7265-01-6

ESTE LIBRO HA SIDO SOMETIDO A PROCESOS DE EVALUACIÓN ACADÉMICA

EDICIÓN Adriana Ramírez Gutiérrez
DISEÑO DE PERFIL DE LA COLECCIÓN Alexis Manuel Rodríguez Diezcabezas de Armada /
Claudio Sotolongo
DISEÑO Reinier Huertemendía Feijoo
COMPOSICIÓN Claudia Allegue Tamayo
CONTROL DE LA CALIDAD Haydée Arango Milián

SOBRE LA PRESENTE EDICIÓN © Octavio Calzadilla, 2022
© Julio Vidal, 2022
© Editorial UH, 2022
ISBN-e 978-959-7265-01-6

EDITORIAL UH Dirección de Publicaciones Académicas,
Universidad de La Habana
Edificio Dihigo, Zapata y G, Plaza de la Revolución,
La Habana, Cuba. CP 10400.
Correo electrónico: editorialuh@fayl.uh.cu
Facebook: editorialuh98

Índice

Presentación	15
COMITÉ ORGANIZADOR	
Un nuevo enfoque de la teoría de la relatividad para principiantes	23
FRIEDRICH HERRMANN	
Carácter interdisciplinario de la Introducción a la Cosmología	37
RAÚL PORTUONDO DUANY	
Cosmología: el arte de utilizar la ciencia para comprender el universo	45
GABRIELLA PICCINELLI BOCCHI, ANTONIO RAMÍREZ	
El estudio de las ciencias espaciales con el apoyo de las TIC	57
JUAN GUSTAVO KESSEL RODRÍGUEZ, BEATRIZ CONSUEGRA LEZCANO, ERNESTO MILLARES RODRÍGUEZ, JORGE MAZORRA ACUAY	
Webmedia de Astronomía para niños de enseñanza primaria	71
MARGARITA LIBERTAD MIRANDA DEL REAL, ERNESTO MILLARES RODRÍGUEZ, LEONARDO CECILIANO HERNÁNDEZ, JUAN KESSEL RODRÍGUEZ	
La astrofísica, sus potencialidades para la formación medioambiental del estudiante universitario	79
ERNESTO MILLARES RODRÍGUEZ, JUAN GUSTAVO KESSEL RODRÍGUEZ, BEATRIZ CONSUEGRA LEZCANO, MARGARITA LIBERTAD MIRANDA DEL REAL	

El medioambiente en un Curso de Introducción a la Cosmología	91
RAÚL PORTUONDO DUANY	
Ciencia y solidaridad en el más alto grado: Maria Sklodowska-Curie	97
CARMEN CARRERAS, MANUEL YUSTE	
Augustin Fresnel: 200 años de la teoría de la difracción de la luz	125
MANUEL YUSTE, CARMEN CARRERAS	
Aplicación de la metrología en Colombia a través del Grupo de Investigación en Metrología Bio-Eléctrica (GIMBE) de la Universidad Tecnológica de Pereira	143
WILLIAM OLARTE, E. Y. CASTRILLÓN, M. A. LÓPEZ	
El punto brillante de Denis Poisson, un apoyo inesperado a la difracción de Fresnel	155
JUAN PEDRO SÁNCHEZ-FERNÁNDEZ, CARMEN CARRERAS, MANUEL YUSTE	
La temática sobre el universo en un máster de formación de profesorado	175
ISABEL VERÓNICA TRICIO GÓMEZ	
Establecimiento de un laboratorio de microgravedad en vehículos suborbitales	187
JOSÉ REFUGIO MARTÍNEZ, G. SAUCEDO-ZÁRATE, J. A. DE LA CRUZ-MENDOZA, E. VÁZQUEZ-MARTÍNEZ, H. GONZÁLEZ-AGUILAR, G. ORTEGA-ZARZOSA Y J. L. ARAUZ-LARA	
Marie Curie: un legado para la ciencia y la humanidad	197
ALICIA CID REBORIDO, J. GRANADOS SAMANIEGO, F. TAVERA ROMERO, J. M. VELÁZQUEZ ARCOS	
Modelo teórico del movimiento de un aerogenerador desde el punto de vista mecánico	223
DAMIÁN CANELLES GÓMEZ, OCTAVIO CALZADILLA, JULIO VIDAL	

Fórmulas <i>versus</i> comprensión de la física; la epistemología al rescate	231
.....	
DIEGO DE JESÚS ALAMINO ORTEGA, YENILE AGUILAR RODRÍGUEZ	
La enseñanza de la Física a través de invariantes de conocimientos: una opción metodológica para los planes de estudios E en la carrera Ingeniería Geológica	243
.....	
ROLANDO COBAS ABAD, ROLANDO M. COBAS GARCÍA, ANALIA COBAS GARCÍA	
Un problema de Física General sobre ondas gravitacionales y fusión de agujeros negros	253
.....	
EDWIN PEDRERO	
Reflexiones sobre el Programa de Física General para carreras de ingeniería en los planes de estudio E. Primeros resultados de las asignaturas impartidas	271
.....	
JUAN ANTONIO ALEJO DÍAZ, JUAN JOSÉ LLOVERA GONZÁLEZ	
Importancia de la mecánica de los fluidos en las carreras ingenieriles	285
.....	
YAMELKA HERRERA HERNÁNDEZ, ANA MARÍA BONNIN GARCÉS, ROLANDO SERRA TOLEDO	
Una propuesta de innovación educativa en la enseñanza-aprendizaje de la Física: impactos y retos	295
.....	
RAFAEL GARCÍA CAÑEDO, ANÍBAL ISAAC SILVA, SILVIA MIRIAM PELL DEL RÍO	
Desarrollo de la asignatura «Energía solar, actualización y uso final», desde la perspectiva de la Física y su contribución a la formación de los ingenieros	311
.....	
GIRALDO JIMÉNEZ CHAPPOTIN, ARCELIO HERNÁNDEZ FERREIRA	
Determinación de la constante de Planck mediante el uso de LED controlados por Arduino	329
.....	
CARLOS ERNESTO CAVO MOLA, ERNESTO GARCÍA ALFONSO, SAMANTHA LÓPEZ PÉREZ, JOELUIS CERUTTI TORRES	

Digitalización de las mediciones de los anillos de Newton	341
JESÚS ALBA, B. PÉREZ, T. MOLINA, OCTAVIO CALZADILLA	
Experiencia sobre el desarrollo de habilidades experimentales en la asignatura Física utilizando aplicaciones móviles	349
ROSAIME GONZÁLEZ DE LOS REYES, ODALYS PORTELA LÓPEZ	
Determinación del momento dipolar magnético de un imán permanente por dos métodos distintos y comparación de sus resultados	361
ARCELIO HERNÁNDEZ FERREIRA, OTHMAN ESPINOSA VALDÉS	
Evaluación de dos montajes de bajo costo para la determinación de la componente horizontal del campo magnético terrestre	369
ARCELIO A. HERNÁNDEZ FERREIRA, OTHMAN ESPINOSA VALDÉS	
La evolución de los instrumentos de medición de las magnitudes físicas y su influencia en la modalidad y resultados de las prácticas de laboratorio de Física. Caso del péndulo simple	379
ARCELIO HERNÁNDEZ FERREIRA, ZÓSIMO ARÉVALO VELOSA, GILBERTO PÉREZ ROQUE	
Registro eléctrico de las oscilaciones mecánicas, ventajas para el estudio de los casos más generales	393
ARCELIO HERNÁNDEZ FERREIRA, OTHMAN ESPINOSA VALDÉS	
Uso de sensores de efecto Hall para la medición de campos magnéticos débiles generados en el laboratorio de Física y su aplicación en montajes dedicados al estudio del campo magnético	405
ARCELIO HERNÁNDEZ FERREIRA, OTHMAN ESPINOSA VALDÉS, CARLOS PITRE ANDRADE	
Implementación de una <i>toolbox</i> en <i>Wolfram Language</i> para la impartición de las clases de Física General	417
ANDRÉS SOLANO GARCÍA, JULIO C. DRAKE-PÉREZ	

Materiales y Diseño: aspectos medioambientales y sociales. El caso del coltán	423
.....	
ANTONIO JOSÉ BERAZAÍN ITURRALDE, CYNTHIA MOLINA GAMONAL	
Las prácticas de laboratorio de Física asistidas por computadoras. Experiencias y proyecciones para una contribución más efectiva a la formación del profesional	439
.....	
ARCELIO HERNÁNDEZ FERREIRA, OTHMAN ESPINOSA VALDÉS, GIRALDO JIMÉNEZ CHAPPOTIN	
La implementación de la realidad aumentada como generadora de nuevas formas de comprensión en electricidad y magnetismo	451
.....	
BLANCA PAOLA AVILA CERVANTES, JAVIER ENRIQUE LÓPEZ MORALES, ARLETH ALEJANDRA OLIVARES CANALES, JUAN ANDRÉS VELÁZQUEZ ESTEVES, GABRIELLA PICCINELLI BOCCHI	
Realidad aumentada en el estudio del electromagnetismo en la formación de ingenieros en Computación	461
.....	
PEDRO URIEL MARTÍNEZ MARTÍNEZ, GABRIELLA PICCINELLI BOCCHI	
Resultados del PROCOLER en un sitio web	477
.....	
J. MAYORGA BUCHELLY, N. ARIAS ÁVILA, VERÓNICA TRICIO GÓMEZ	
El <i>software</i> en el laboratorio de Física, una alternativa para el desarrollo de competencias profesionales	489
.....	
BEATRIZ CONSUEGRA LEZCANO, MARGARITA LIBERTAD MIRANDA DEL REAL, LEONARDO CECILIANO HERNÁNDEZ, ERNESTO MILLARES RODRÍGUEZ	
Anexo 1. Programa del VIII Taller Iberoamericano de Enseñanza de la Física Universitaria	503
.....	
Sobre los autores	515
.....	



VIII Taller Iberoamericano
de Enseñanza de la Física Universitaria
(Tibero)

Presentación

Los Talleres Iberoamericanos de Enseñanza de la Física Universitaria surgieron como fruto de la colaboración en la esfera de la enseñanza universitaria entre la Facultad de Física de la Universidad de La Habana (UH) y varias universidades españolas, fundamentalmente la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), la Universidad de Burgos y la Universidad de Córdoba. Esta colaboración fue muy activa en la elaboración de materiales didácticos y en el desarrollo de laboratorios docentes. Debido a los fructíferos resultados, se pensó en organizar una reunión que permitiera evaluarlos y discutirlos en el área iberoamericana. Así, se convocó el Taller Iberoamericano de Enseñanza de la Física Universitaria (Tibero), que se celebró en la Facultad de Física de la UH en enero de 1997.

Esta reunión permitió tener un acercamiento a la realidad de la enseñanza en la región y tomar consciencia de sus logros y carencias. Se hizo evidente la necesidad de un programa de superación para profesores, pues muchos de ellos se encontraban impartiendo clases de Física en distintos niveles educativos y con perfiles muy diferentes a los de un físico. Como extensión de este primer taller se organizó una Escuela de Superación de Profesores de Física. También se propuso crear un espacio (nuevas ediciones de Tibero) que permitiera a los profesores exponer sus experiencias y fundamentarlas sobre bases científicas. Hasta la fecha se han realizado ocho ediciones de los talleres (1997, 2000, 2003, 2007, 2009, 2012, 2016 y 2019) y dos cursos de superación y actualización de profesores de Física (1998 y 1999).

El objetivo principal de los Talleres Iberoamericanos de Enseñanza de la Física Universitaria ha sido la actualización de los profesores de Física para fortalecer el proceso de enseñanza-aprendizaje en esta disciplina. Además, estos talleres crean un clima propicio para que

profesores de Física de Cuba y de otros países de Iberoamérica y Europa, principalmente del nivel universitario, presenten los resultados de sus actividades en el campo de la investigación educativa llevadas a cabo con el objetivo de la mejora continua en la calidad de la enseñanza de la disciplina, de compartir sus experiencias y de atraer estudiantes a esta ciencia. A través de todas las actividades que se desarrollan en dichos talleres, se ponen en evidencia problemas comunes en el área iberoamericana y se presentan diferentes métodos de trabajo para intentar resolverlos.

En esta ocasión el VIII Taller Iberoamericano de Enseñanza de la Física Universitaria fue convocado por La Universidad de La Habana y la Sociedad Cubana de Física, en colaboración con la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED) y la Universidad de Burgos, ambas de España, y Karlsruhe Institute of Technology, de Alemania. Se celebró en la Facultad de Física de la Universidad de La Habana, del 11 al 15 de marzo de 2019. El tema central del taller fue «Introducción de la Cosmología en los programas de la Licenciatura en Física». Además, se impartió un curso de actualización para los participantes en la temática de electricidad y magnetismo.

Otros temas tratados en el VIII Taller fueron:

- Actualizaciones en temas fronteras de la Física.
- Experiencias en el proceso de enseñanza-aprendizaje para mejorar las habilidades profesionales en las carreras de Física.
- El papel de la enseñanza experimental y el procesamiento de los datos en el aprendizaje de la Física.
- La enseñanza de la Física en la formación de profesionales de otras especialidades.
- Las vías no formales de enseñanza de la Física.

En el evento se realizaron las siguientes actividades: un curso de actualización en electromagnetismo, trece conferencias magistrales, una mesa redonda, catorce comunicaciones cortas y treinta y seis presentaciones en formato de carteles.

La conferencia inaugural, «Ciencia y tecnología en la aventura espacial: el caso de Marte», fue impartida por el profesor Fernando Rull Pérez, director de la Unidad Asociada UVA-CSIC (Consejo Superior de Investigaciones Científicas) al Centro de Astrobiología afiliado al NASA Astrobiology Institute (España).



Figura 1. El profesor Fernando Rull Pérez en la conferencia inaugural del VIII Taller Iberoamericano de Enseñanza de la Física Universitaria.

El profesor Augusto Beléndez Vázquez, del Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal de la Universidad de Alicante (España), tuvo a su cargo la conferencia de clausura, «James Clerk Maxwell y las ecuaciones que cambiaron el mundo».



Figura 2. El profesor Augusto Beléndez Vázquez junto a la profesora María M. Sánchez Colina, presidenta de la Sociedad Cubana de Física.

Estos fueron los participantes por países: Alemania: 1, Colombia: 4, Cuba: 33, España: 6, México: 6, Puerto Rico: 1.



Figura 3. Participantes en el VIII Taller Iberoamericano de Enseñanza de la Física Universitaria.

Como resultados del taller se acordó iniciar la formación de un grupo de trabajo entre varias universidades para elaborar un curso *online* gratuito sobre el tema de astrofísica y cosmología, que podría estar disponible en las plataformas virtuales de las universidades.

Por otra parte, se valoró el criterio de estudiantes que manifestaron haber entrado a la universidad para iniciar sus estudios de Física entusiasmados por temas de astrofísica, cosmología, etc. (que les habían introducido en preuniversitario) y, sin embargo, se habían desilusionado al finalizar el primer año al ver que no se estudiaban esos temas.

Además, se creó un repositorio para el intercambio de información relacionada con la docencia, disponible en https://unedo365-my.sharepoint.com/:f/g/personal/jpsanchez_ccia_uned_es/Eo1010MSZ-BHsCpgild4BckB-k39N95CGITb96lur_5ffQ?e=51mn5g.

En este volumen se han publicado los trabajos enviados por los participantes en el taller, los cuales hemos organizados en cuatro secciones: «Cosmología», «Experiencias en el proceso de enseñanza-aprendizaje», «El uso de las tecnologías» y «La enseñanza experi-

mental». En cada una de las secciones se incluyen las conferencias que se enviaron para su publicación y las contribuciones de los participantes. Para una mayor información se ha incorporado el programa de trabajo que se siguió en el taller, donde aparecen los resúmenes de las conferencias cuyos textos íntegros no fueron publicados.

COMITÉ ORGANIZADOR



I. Cosmología



Un nuevo enfoque de la teoría de la relatividad para principiantes

FRIEDRICH HERRMANN*

Introducción

Presentamos algunos conceptos básicos para un curso sobre la física relativista. Estos conceptos son parte del Curso de Física de Karlsruhe, que ha sido desarrollado y experimentado desde los años ochenta y puede descargarse de Internet (<http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/>).

La relatividad especial y la relatividad general corresponden a unas quince lecciones cada una. Por un lado, esto no es mucho comparado, por ejemplo, con la electrodinámica. Por otro, es mucho, en vista del escaso tiempo de enseñanza. Sin embargo, la unidad didáctica está diseñada de tal manera que se puede limitar a enseñar solamente una parte del curso.

En primer lugar, un comentario general sobre el desarrollo de nuevos conceptos de enseñanza: el conocimiento científico aumenta constantemente, mientras el tiempo de enseñanza sigue siendo el mismo. Por lo tanto, los temas científicos deben ser procesados continuamente. En nuestra opinión, esta es la tarea más urgente de la didáctica. Un tratamiento adecuado no solo reduce el tiempo de enseñanza, sino que también aporta más claridad y conduce a una mejor comprensión. La omisión de un tema o de un detalle en lugares adecuados no es una pérdida, sino un beneficio. Nuestra propuesta para la teoría de la relatividad también debe ser vista desde este punto de vista.

No podemos presentar todo el curso aquí. En las siguientes secciones solo presentamos algunos aspectos característicos.

* Institute for Theoretical Solid State Physics, Karlsruhe Institute of Technology, Alemania.

1. La teoría de la relatividad y el cambio del sistema de referencia

Se sabe que un tema central en la teoría de la relatividad, pero especialmente en la teoría de la relatividad especial, es el cambio del sistema de referencia. Aquí hay algunas afirmaciones que se considerarán importantes:

- La velocidad de la luz es independiente del *sistema de referencia*.
- La simultaneidad de dos eventos depende del *sistema de referencia*.
- Las longitudes y los intervalos de tiempo cambian cuando se cambia el *sistema de referencia*.
- La paradoja de los gemelos resulta de la descripción de un proceso en diferentes *sistemas de referencia*.

He aquí nuestra primera sugerencia: evitar cambiar el sistema de referencia. Este tema requiere tiempo y de manera casi inevitable crea confusión.

Esto se puede ver con un ejemplo sencillo: imaginamos que es el 30 de marzo, un sábado. En la noche siguiente los relojes se cambiarán a la hora de verano. A las 7:00 de la tarde alguien dice: «Mañana, a esta hora, será aún de día». Y alguien más dice: «Mañana, a esta hora, ya son las 8». ¿Quién tiene razón? ¿Uno, el otro, ambos o ninguno?

A pesar de que el problema es sencillo desde el punto de vista matemático, causa dificultades inesperadas. También de este tipo son las dificultades que trae consigo el cambio del sistema de referencia en la teoría de la relatividad, pero en mayor medida.

¿Cómo hacer frente a este problema? Recomendamos atenerse a dos reglas:

1. Seleccionar un sistema de referencia adecuado al principio y no cambiarlo más. (Esto es normal en la física de todos modos. También en la física clásica se puede crear mucha confusión simplemente cambiando el sistema de referencia).
2. Citamos a Wheeler: «No intentar describir el movimiento relativo a objetos lejanos. La física es simple solo cuando se analiza localmente» (Misner, Thorne y Wheeler, 1973, p. 4). Así que es mejor no hacer las preguntas: ¿qué indica ahora el reloj del gemelo lejano? y ¿qué cree él que indica nuestro reloj?

Se podría objetar que, de este modo, se eliminan los temas más importantes de la teoría de la relatividad. Nosotros pensamos que no. Por el contrario, hemos creado espacio para los temas verdaderamente importantes, en particular para la dinámica relativista.

Para tomar la decisión de abstenerse de los cambios del sistema de referencia es útil saber dónde se origina esta costumbre de iniciar el tratamiento de la teoría de la relatividad con este tema. La razón es la misma que para muchos otros temas inadecuados de la enseñanza de la Física: había surgido históricamente de esta manera y, más bien, por casualidad. Supongamos que la teoría de la relatividad no hubiera sido iniciada a partir de la electrodinámica y no hubiera existido el experimento de Michelson y Morley, pero lo primero que se hubiera notado fuera que la energía es igual a la masa: que el café caliente es más pesado que el frío, o que la batería llena es más pesada que la vacía, o que las partículas en un acelerador se vuelven más pesadas a medida que pasan por el acelerador. Es seguro que los libros sobre la teoría de la relatividad hoy en día se verían muy diferentes.

2. Sincronización de relojes

El concepto de simultaneidad y el proceso de sincronización de relojes aparecen como temas inevitables al principio de la introducción de la teoría de la relatividad. El célebre artículo de Einstein (1905) comienza con el tema. Einstein lo extiende a lo largo de tres páginas. Pero no olvidemos que esto fue en 1905 y que los numerosos efectos relativistas que conocemos hoy en día eran todavía desconocidos en esa época. Pero, sobre todo: Einstein todavía no sabía que tan solo diez años más tarde terminaría una teoría aún más revolucionaria, la cual muestra que en general, es decir, en un espacio-tiempo curvo, los relojes ya no pueden ser sincronizados de todos modos.

Por cierto, la sincronización es exactamente una operación que viola nuestra segunda norma: no trate de describir el movimiento relativo a objetos lejanos.

3. La identidad de energía y masa

En nuestro enfoque la afirmación de que la energía y la masa son la misma magnitud física se encuentra al principio. La escribimos así:

$$E = k \cdot m$$

Aquí k es un factor de conversión para las unidades de medida, es decir, para la conversión de kg en J. E y m son la misma magnitud física. Se emplea el símbolo m si se mide en *kilogramos*, y el símbolo E si se mide en julios. Es como convertir una longitud de metros en pies.

Por cierto, no escribimos:

$$E = m \cdot c^2$$

porque sugeriría que la energía es proporcional al cuadrado de la velocidad de la luz. Pero no lo es, porque c no es una variable.

Tampoco llamamos a la constante c «velocidad de la luz», porque eso daría la impresión de que la luz juega un papel especial en la teoría de la relatividad. Pero no es así, c es un límite de velocidad para cualquier transporte, para cada cuerpo, para cada partícula.

4. La dinámica relativista

En nuestro curso la mecánica relativista comienza con la dinámica, no con la cinemática. Por un lado, la dinámica es más sencilla y, por otro, más importante que la cinemática. Además, no tiene nada que ver con los cambios del sistema de referencia.

Veamos brevemente cómo las relaciones más importantes de la dinámica relativista se pueden derivar de unos pocos postulados. Se trata en particular de las dependencias de la masa/energía y de la velocidad del *momentum*.

Obtenemos todas las relaciones importantes a partir de la exigencia de que la masa y la energía son la misma magnitud física.

Preferimos escoger el *momentum* como variable independiente porque es el de un cuerpo o de una partícula que se puede cambiar fácilmente. Partimos de la mecánica clásica. Necesitamos las dos relaciones:

$$dE = v dp \tag{1}$$

$$p = m \cdot v \tag{2}$$

Donde:

E : energía

v : velocidad

p : *momentum*

m : masa

Para obtener las relaciones relativistas exigimos que la energía sea idéntica a la masa:

$$E = k \cdot m \quad (3)$$

k es una constante física. Su valor se obtiene experimentalmente:

$$k = 9 \cdot 10^{16} \text{ J/kg}$$

Con (2) y (3) se puede escribir:

$$p = \frac{E}{k} v \quad (4)$$

4.1. La relación energía-*momentum*

A partir de las ecuaciones (1) y (4) obtenemos:

$$dE = \frac{k}{E} p dp$$

o sea

$$EdE = k \cdot p dp$$

Aceleramos un cuerpo (una partícula) desde el reposo (energía al reposo E_0) hasta que tiene el *momentum* p . A este proceso corresponde una integración:

$$\int_{E_0}^E EdE = k \int_0^p p dp$$

Obtenemos:

$$E^2 - E_0^2 = kp^2 \quad (5)$$

o

$$E(p) = \sqrt{E_0^2 + kp^2}$$

Esta es una de las ecuaciones más importantes de la dinámica relativista (figura 1).

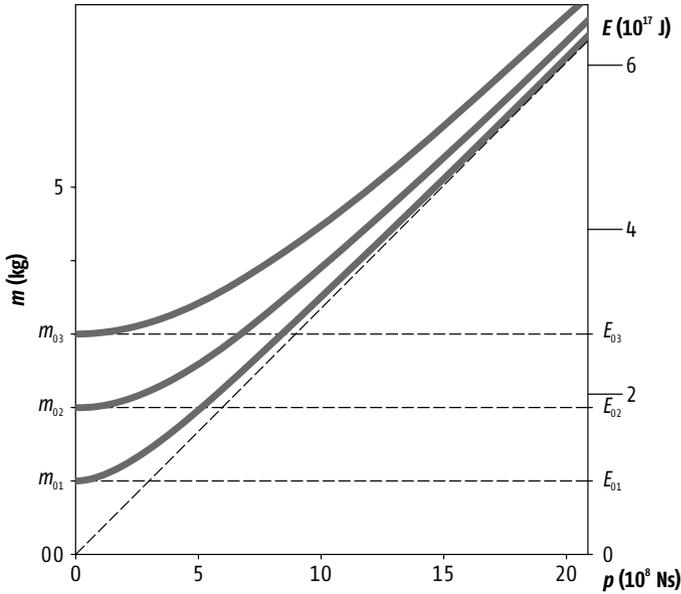


Figura 1. Relación energía-*momentum*.

4.2. La relación energía-velocidad

Si reemplazamos el *momentum* en la relación (5) utilizando la ecuación (4), obtenemos:

$$E^2 - \frac{E^2 v^2}{k} = E_0^2$$

De esto conseguimos:

$$E(v) = \frac{E_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{k}}} \quad (6)$$

o bien:

$$v(E) = \sqrt{k} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{E_0}{E}\right)^2}$$

De esto se deduce que, en el caso de grandes valores de la energía, la velocidad se aproxima a un valor límite:

Para $E \rightarrow \infty$ tenemos:

$$v \rightarrow \sqrt{k}$$

A este límite de velocidad abreviamos por c :

$$\sqrt{k} = c$$

y para la expresión:

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

usamos la abreviatura γ .

Así, la ecuación (6) se puede escribir:

$$E(v) = \gamma E_0 \tag{7}$$

4.3. La relación velocidad-momentum

Partiendo de la ecuación (4) y usando (7) obtenemos:

$$p = \frac{E}{k} v = \frac{\gamma E_0}{k} v$$

Llamaremos

$$E_0 = k \cdot m_0$$

y obtenemos:

$$p = \gamma m_0 v$$

o

$$v(p) = c \frac{p}{\sqrt{c^2 m_0^2 + p^2}}$$

La figura 2 muestra que para valores grandes del *momentum* la velocidad se aproxima a la velocidad límite c .

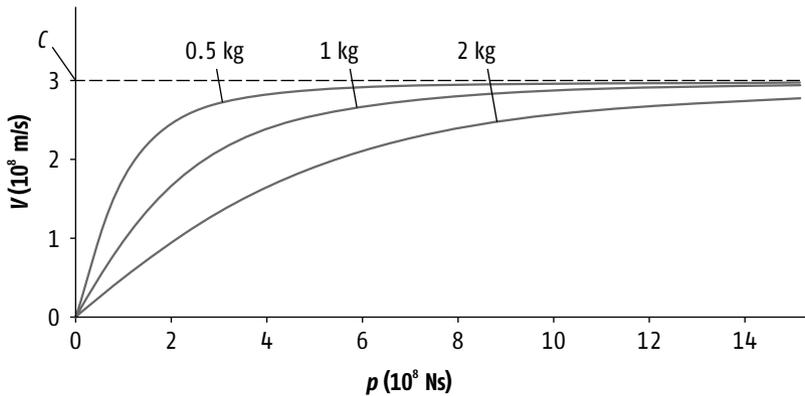


Figura 2. Relación velocidad-*momentum*.

5. El espacio-tiempo

Dos personas viajan en dos coches desde un punto de partida común, independientemente el uno del otro, en distintas carreteras, y se encuentran de nuevo. Sus cuentakilómetros indican que han recorrido diferentes distancias. Todo el mundo lo sabe. Sin embargo, también comparan sus relojes y descubren que el tiempo ha pasado de manera diferente para cada uno de ellos. Este es un efecto de la física relativista. Es un efecto que normalmente no se nota. Solo es importante si se cumple al menos una de las dos condiciones siguientes:

- La precisión de la medición es muy alta.
- Las velocidades son muy altas.

Es importante notar que no se necesita un sistema de referencia para describir esta observación y para pronunciar la correspondiente regla, y desde luego, no se necesita ningún cambio del sistema de referencia.

En nuestro curso se tratan los detalles siguientes:

- La persona cuya línea mundial corresponde a un movimiento libre, es decir, no hay fuerzas que no sean fuerzas gravitacionales, es la que más ha envejecido. Para aquellos que se mueven entre el punto de partida y el punto de espacio final a la velocidad límite, el tiempo pasado es cero.
- Esto muestra que el espacio y el tiempo están vinculados y que forman una unidad, así como las tres dimensiones del espacio ya forman una unidad.

6. Los cuadvectores

La teoría de la relatividad se vuelve formalmente simple y estética cuando se introducen los cuadvectores. Solo así quedará claro lo que significa: «el espacio y el tiempo forman una unidad». En cuanto a la enseñanza secundaria, al liceo, no sería realista introducir cuadvectores. Los estudiantes habrían tenido que «desaprender» todo lo que habían aprendido antes.

Si describimos todo en el espacio-tiempo, no hay más trayectorias, sino solo líneas de universo. Ya no podemos hablar de movimiento: un cuerpo no se mueve en una línea de universo –aunque esto se dice a menudo–. Ya no habría fuerzas gravitacionales; ni ley de la gravitación, ni órbitas circulares o elípticas.

En nuestro enfoque, la teoría general de la relatividad solo entra en juego por el hecho de que el espacio es curvo. Con «espacio» nos referimos al espacio tridimensional. Por consiguiente, la trayectoria de una partícula está determinada por dos ingredientes:

1. las fuerzas gravitacionales, que tratamos al estilo newtoniano, y
2. la curvatura del espacio tridimensional.

Sin embargo, si uno procede de esta manera, surge un pequeño problema: ¿cómo se puede ver que la trayectoria de un cuerpo, como la del planeta Mercurio, o de la luz que pasa al lado del Sol, depende de dos efectos? O, dicho de otra manera: ¿cómo puede uno ver el efecto de la curvatura del espacio solo?

Hacemos el siguiente experimento hipotético: consideramos una estrella central y un cuerpo que de alguna manera

pasa volando a su lado. Su órbita se desvía por los dos efectos mencionados: la atracción gravitacional clásica y la curvatura del espacio. Ahora cargamos eléctricamente la estrella central y el cuerpo que pasa, con cargas del mismo signo, de tal manera que la atracción gravitacional queda compensada. La órbita resultante del cuerpo es solo un efecto de la curvatura del espacio: una geodésica en el espacio tridimensional.

Hay una segunda posibilidad de realizar una geodésica del espacio tridimensional. Se considera una varilla con la siguiente propiedad: no tiene masa y es absolutamente rígida. Esta varilla hipotética tiene la forma de una geodésica.

Para familiarizarse con estas geodésicas, hemos realizado un programa interactivo que funciona en el navegador (Herrmann y Halupczok, s. f.).

7. Cambio de longitud o cambio de volumen

Consideramos un cuerpo celeste de gran masa. El espacio (tridimensional) se deforma en su entorno, según la métrica de Schwarzschild. ¿Cómo se puede describir este hecho de la manera más vívida posible?

Por un lado, por supuesto, decimos que un reloj cerca del centro del cuerpo va más lento que uno más lejos. Esto se puede observar de modo experimental, aunque en realidad ya es una violación de la regla de Wheeler: la física solo es simple si las cosas se ven localmente. De manera análoga, se podría decir que las reglas de medición parecen acortarse desde un punto de vista lejano. Sin embargo, nuestra experiencia ha sido que tal descripción de manera casi inevitable conduce a las temidas discusiones infructuosas.

Pero hay un modo de decir de forma más clara lo que le pasa al espacio. Primero lo explicamos con el ejemplo de un mundo bidimensional: un agricultor ha comprado un terreno cuadrado y deja que sus ovejas pasten allí (figura 3a). El negocio va bien y quiere criar más ovejas, pero no puede comprar más tierras. ¿Qué está haciendo? Hace una colina (figura 3b). El área de su pasto aumenta y su mundo bidimensional se curva. Es importante notar que no necesitamos un sistema de coordenadas para llegar a esta conclusión, no necesitamos reglas que se prolongan o se contraen.

Lo mismo se aplica al espacio tridimensional (figura 4). Un cubo vacío grande tiene el volumen a^3 ; pero si hay un objeto pesado en él, una estrella de neutrones o un agujero negro, hay más espacio en el cubo. Su volumen es mayor que a^3 .

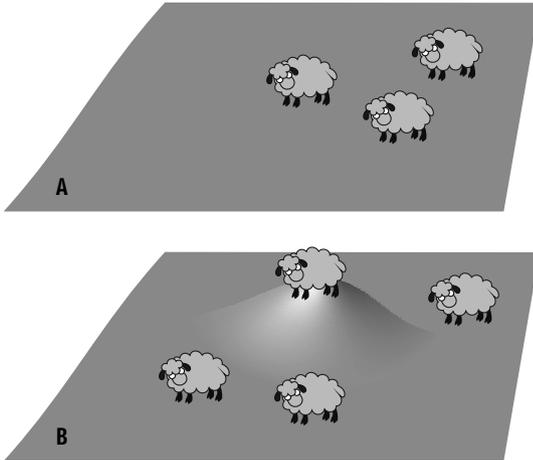


Figura 3. a. Pasto *non*-curvo. b. Pasto curvo, mayor superficie.

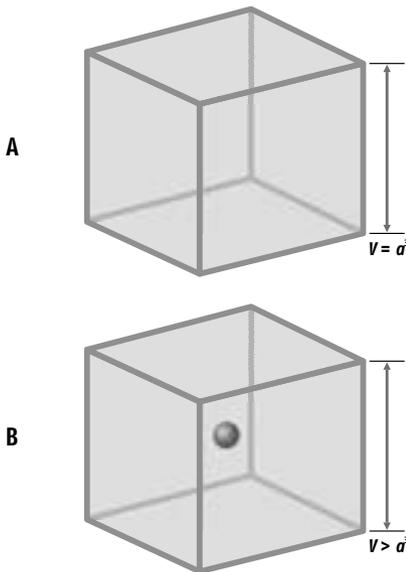


Figura 4. a. Espacio *non*-curvo. b. Espacio curvo, mayor volumen.

8. El universo plano

Los estudiantes se han familiarizado con la idea de que el espacio no suele ser plano. Es importante que lleguen al punto de encontrar normal el hecho de que el espacio es curvo. Ahora consideramos al sistema «universo». Con el conocimiento previo de la curvatura del espacio, es normal esperar que el cosmos en su conjunto, es decir, a gran escala, sea curvo.

Esta curvatura global ha sido examinada y medida por los científicos, y se ha hecho una observación sorprendente: el universo es plano. Esa es la idea del cosmos que el ciudadano de a pie tiene de todos modos.

Por lo tanto, es importante crear primero la expectativa de que no es así. Solo entonces se sorprende de que sea non-curvo, que sea euclídeo. Esta propiedad de nuestro universo parece ser un caso especial muy improbable, y este hecho necesita una explicación. Así que el objetivo de la enseñanza no es «el universo es euclídeo»; sino «es un milagro que sea euclídeo». La explicación de esta planitud es un tema de investigación actual.

9. El espacio absoluto y el espacio-tiempo absoluto

Si uno tiene una idea tan concreta del espacio-tiempo o, en nuestro caso, del espacio; o sea, que el espacio no es solo «espacio para algo», sino que es algo presente, ya no es de extrañar que en este material se puedan propagar ondas.

Para Newton el espacio era «algo». Según él, había un «espacio absoluto». Por esta idea fue criticado más tarde por muchos científicos. Hasta los libros de texto actuales afirman que no existe un espacio absoluto. Un libro de texto alemán, por ejemplo, dice: «Era necesario denunciar las palabras “tiempo absoluto” y “espacio absoluto” como prejuicios mágicos no probados de la física prerrelativista».

Ahora, la teoría de la relatividad ha demostrado que la idea de Newton era muy sensata. Desde el punto de vista de hoy, el espacio absoluto de Newton puede considerarse como un precursor del espacio-tiempo moderno. Por supuesto, Newton aún no conocía la curvatura del espacio, no conocía la influencia de la materia sobre el espacio y, aún no sabía nada del vínculo entre el espacio y el tiempo. Sin embargo, no estaba lejos de la idea moderna, porque hoy lo sabemos: hay un espacio-tiempo absoluto con propiedades locales.

Bibliografía

MISNER, C. W.; K. THORNE y J. A. WHEELER (1973): *Gravitation*, Princeton: W. H. Freeman and Company.

EINSTEIN, A. (1905): «Zur Elektrodynamik bewegter Körper», *Annalen der Physik*, vol. 332, issue 10, pp. 891-921.

HERRMANN, F. y I. HALUPCZOK (s. f.): «Geodesics», <<http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/software/geodesiclab/a3.html>> y <<https://www.youtube.com/watch?v=Wl8--BsbNnA&feature=youtube>>.



Carácter interdisciplinario de la Introducción a la Cosmología

RAÚL PORTUONDO DUANY*

Introducción

Un curso introductorio de Cosmología puede ir dirigido al estudio del surgimiento y la evolución del universo en relación solo con los cuerpos celestes (radiación, materia, antimateria, galaxias, estrella, planetas, cometas, asteroides, materia oscura, energía oscura, etc.). Pero el cosmos en su totalidad abarca otros componentes de la realidad que no deben ser descuidados: surgimiento y evolución de los elementos químicos, de los compuestos orgánicos, evolución de la Tierra, surgimiento de la vida y su desarrollo, surgimiento de una sociedad tecnológica avanzada, posibilidades de vida en otros lugares (microscópica y tecnológica).

Este tipo de curso quedaría recargado con conocimientos de astrofísica, con un alto nivel matemático y con leyes de la física clásica, de la cuántica y de la relativista. Sería un curso de la fase final de la Licenciatura en Física, a pesar de ser introductorio.

Un curso de Cosmología más general sería más apropiado para el primer año de la carrera, al que el estudiante llega con sus estudios recientes en las esferas de la física, la química, la biología y las ciencias naturales de los años preuniversitarios. Puede mostrarse en él cómo se interrelacionan los conocimientos básicos de estas disciplinas, sin complejidades matemáticas, y se puede apreciar el valor del trabajo interdisciplinario y cooperativo de los diferentes científicos, aspecto muy importante en el mundo actual.

* Departamento de Física, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez.

Desarrollo

Las leyes de la Física dominan la evolución del universo desde los primeros 10^{-43} s después del Big Bang hasta los primeros cuatrocientos mil años más tarde. Desde $t = 0$ hasta los 10^{-43} s no existe explicación alguna (una «fluctuación», una «singularidad»...): en las reducidas dimensiones del universo para esos momentos iniciales no se ha encontrado aún una teoría cuántico-gravitatoria aceptable. Pero de 10^{-43} s en adelante hay posibles explicaciones físicas: campos de interacciones que se van separando del campo unificado (inicial el gravitatorio primero, el nuclear a continuación) la condensación de la energía en cuarks y anticuarks, una inflación violenta del espacio-tiempo al cabo de 10^{-33} s (figura 1), la separación del campo electro-débil en sus dos componentes, la formación de protones y neutrones al cabo de 10^{-7} s, la formación de los primeros núcleos de deuterio, tritio, helio-3, helio-4 y trazas de núcleos de litio. En su expansión la temperatura del universo va bajando y al cabo de unos minutos después del Big Bang ya no hay suficiente agitación térmica entre los nucleones para formar núcleos más pesados: es un universo de hidrógeno (80 %), helio (20 %), algo de litio y electrones sobrantes que no se desaparecieron como radiación, gracias al desbalance inicial entre electrones y antielectrones.

La radiación luminosa que se produce con las temperaturas aún altas se emite y absorbe casi de manera instantánea debido a la densa sopa de electrones y núcleos positivos de H y He: la luz rebota continuamente sin poder avanzar largas distancias (como la luz en la niebla o en el interior de las estrellas: mucho *resplandor*, pero no se ve nada). Al cabo de unos cuatrocientos mil años se enfría el universo lo suficiente para que se formen átomos neutros de H y He: cesa el resplandor y cesa la luz, entrando el universo en una era oscura que dura unos cuatrocientos millones de años. La radiación electromagnética que se desprendió en todas direcciones de aquella materia caliente al formarse los primeros átomos neutros ya no fue absorbida por electrones libres ni por iones, y se pudo expandir sin fin, quedando en el espacio como reliquia histórica de aquel momento. Esta es la radiación de fondo («ruido electromagnético») que se detectó en la década de 1960, con una longitud de onda mucho mayor que la que tenía al ser emitida, como corresponde a la expansión del universo transcurrido desde su emisión y su efecto Doppler: esta es la prueba más directa que se tiene de la teoría de expansión del universo a partir del Big Bang.

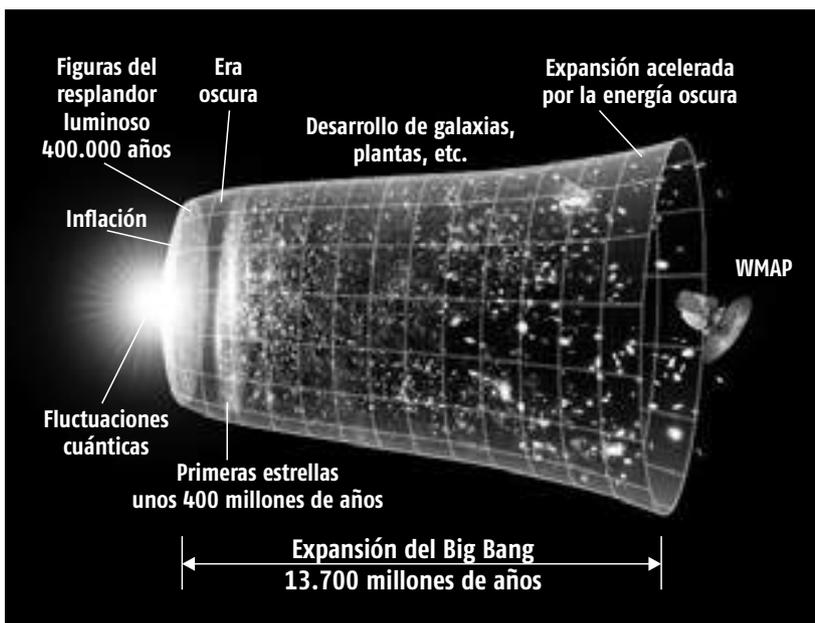


Figura 1. Evolución del universo desde el Big Bang hasta el presente.

En los siguientes cuatrocientos millones de años, la gravedad hizo su trabajo de condensación de masas de H y He en torno a los «bultos» de gases que por fluctuaciones esporádicas ocurrían en los átomos de estos elementos primigenios: se formaron las primeras grandes estrellas, de masas descomunales comparadas con la mayor parte de las estrellas actuales, con abundancia de novas y supernovas que en pocos millones de años explotaban al no soportar sus propios pesos, dando lugar a la síntesis nuclear de elementos más pesados que el H y el He; comienzan a aparecer nuevos elementos químicos de la tabla periódica por procesos nucleares. Se forman estrellas de segunda generación y se configuran las galaxias.

Hasta aquí la Física sigue siendo la ciencia que explica la evolución del universo a partir de las interacciones gravitatorias, electromagnéticas y nucleares. La Vía Láctea, nuestra galaxia, surge mil millones de años después del Big Bang (hace unos trece mil millones de años). Con las explosiones abundantes de supernovas y la formación de estrellas de segunda y tercera generación empiezan a aparecer cuerpos rocosos: asteroides y planetoides. Y la química empieza a regir en la formación de minerales en los asteroides y planetas. Incluso, en las nubes gaseosas

de la galaxia se han detectado, por espectroscopía, moléculas orgánicas esenciales para la vida a partir del carbono, así como en algunos meteoritos llegados a la Tierra.

Hace unos cinco mil millones de años se formó nuestro Sol y su sistema planetario a partir de residuos de alguna supernova anterior. En la época inicial de nuestro planeta (figura 2), aún con altas temperaturas, pero ya con agua líquida, hay posibilidades de que se produjeran las formas más primitivas de vida. El primer agregado molecular capaz de intercambiar sustancias químicas entre su interior y su exterior acuoso a través de una membrana natural de polipéptidos (figura 3), y reproducirse a partir de cierto grado de complejidad alcanzado con esos intercambios, es actualmente solo una hipótesis: las condiciones exactas para que este germen de vida alcanzara un metabolismo primitivo y una reproducción por bipartición no se conocen. Pero aceptando que de manera natural se den esas condiciones iniciales, las leyes de la evolución biológica permiten explicar el desarrollo posterior de la vida en nuestro planeta, a partir la adaptabilidad al medio químico primero, y a partir de la competencia entre individuos por el medio físico-químico y ambiental más adelante.



Figura 2. Formación del Sol y su sistema planetario.

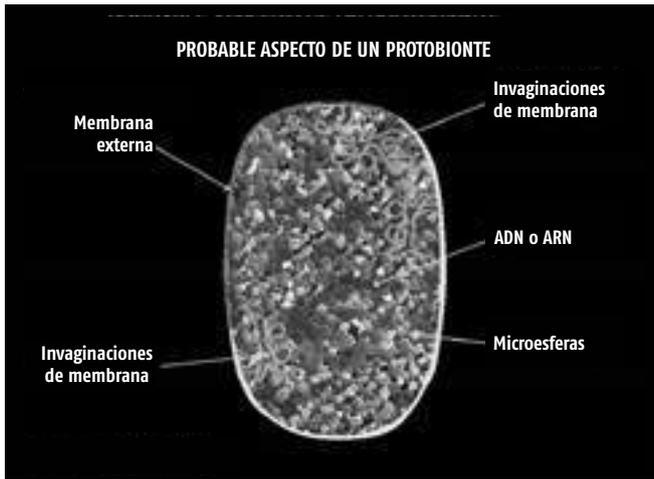


Figura 3. Surgimiento del primer agregado molecular.

Y aquí ya estamos de lleno en el terreno de la biología evolutiva, que va paralela con la descripción de las formaciones geológicas que corresponden a cada época. Se integran la química del ambiente de cada época (responsable de algunas extinciones masivas) y los análisis físicos de datación por isótopos de las rocas, minerales y fósiles. Los análisis geológicos, zoológicos y botánicos de los distintos continentes y sus costas permiten desarrollar el modelo de placas tectónicas y sus movimientos (figura 4).

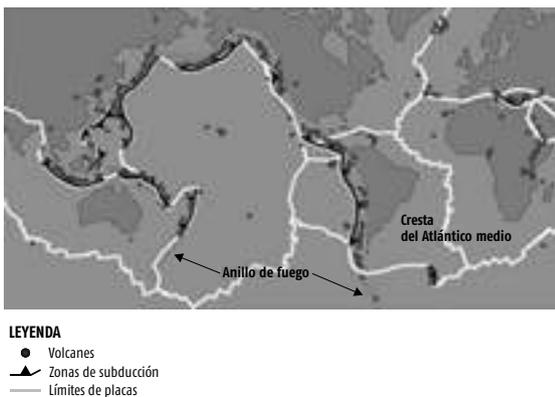


Figura 4. Modelo de placas tectónicas y sus movimientos.

La interdisciplinaridad se hace fuerte donde coinciden los estudios vulcanológicos y sísmicos con los físicos, químicos y biológicos para entender la dinámica de nuestro planeta y las condiciones tan especiales que reúne para poder reciclar los materiales necesarios para la vida y mantener por millones de años las condiciones ambientales que soportan la vida misma (que no se dan en Venus ni Marte).

La evolución del cosmos queda resumida en la figura 5.

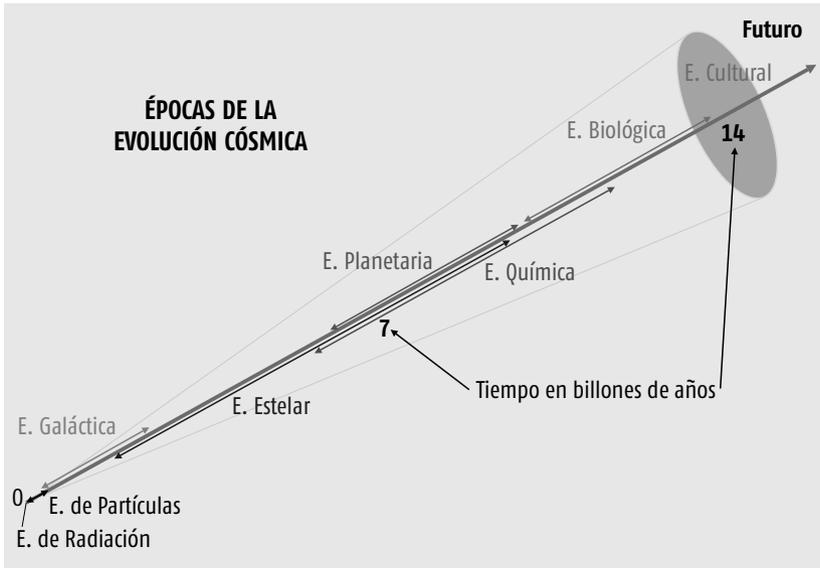


Figura 5. Épocas de la evolución cósmica.

El desarrollo del ser humano como especie dominante del planeta excede ya los límites de la biología y requiere de análisis sociológicos, históricos y psicológicos. La influencia de la sociedad humana en el clima y el ambiente entra en los estudios ecológicos que realizan varias ciencias. La tecnología actual está acelerando el cambio climático que, más tarde o más temprano, deberá ocurrir en el ciclo de glaciaciones y calentamientos que viene sufriendo la Tierra en los últimos dos millones de años. Debemos esforzarnos por no destruir el clima antes de lograr nuevas fuentes de energía renovables que permitan la subsistencia de la humanidad.

Es predecible el futuro de la Tierra a largo plazo, pues se conoce el ciclo de existencia de las estrellas: a nuestro Sol le restan unos cinco mil millones de años antes de sucumbir como enana blanca.

Pero mucho antes se habrá expandido hasta engullirse a Mercurio y Venus. La Tierra estará calcinada en unos dos mil millones de años y la vida habrá desaparecido con anterioridad. Confiamos en que la humanidad sepa desarrollar la tecnología necesaria para viajar a otras estrellas y sus planetas antes de extinguirse en la Tierra. Se prevé que animales complejos como el ser humano pueden gozar de condiciones ambientales soportables hasta dentro de unos 500 millones de años en la Tierra, pero seguramente con menos habitantes que los que existen ahora. Al cabo de ese tiempo, ya habrá altas temperaturas, y puede fallar la energía nuclear interna que propulsa el movimiento de las placas tectónicas y el reciclaje de materiales para sostener la vida en la Tierra.

Conclusiones

En este breve recorrido de la evolución cósmica que incluye la vida, hemos visto cómo se interrelacionan diferentes áreas del conocimiento que hacen del curso de Introducción a la Cosmología un rico campo de aprendizaje interdisciplinario, con un fuerte peso específico en la influencia de la Física.

Bibliografía

- CHAISSON, E. (2005): *Epic of Evolution*, New York: Columbia University Press.
- GRASSE TYSON, N. DE Y D. GOLDSMITH (2004): *Origins*, New York: W. W. Norton and Co.
- MATHEZ, E. A. y J. D. WEBSTER (2004): *The Earth Machine*, New York: Columbia University Press.
- PORTUONDO, D. R. (2014): *Introducción a la Cosmología*, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez.
- REES, M. (2002): *Nuestro hábitat cósmico*, Barcelona: Paidós.
- SOUTHWOOD, R. (2003): *La historia de la vida*, Buenos Aires: El Ateneo.
- WARD, P. D. y D. BROWNLEE (2000): *Rare Earth*, New York: Copernicus Books.
- WARD, P. D. y D. BROWNLEE (2004): *Life and Death of Planet Earth*, New York: Henry Holt and Co.



Cosmología: el arte de utilizar la ciencia para comprender el universo

GABRIELLA PICCINELLI BOCCHI,* ANTONIO RAMÍREZ**

Introducción

La física es, sin lugar a dudas, una de las áreas del conocimiento humano que más ha sido desarrollada en los últimos siglos. En gran medida, esta afirmación se basa en que una gran parte de las predicciones de las teorías físicas han sido comprobadas sólidamente con experimentos en laboratorio y, en muchos casos, los conceptos han sido aplicados con éxito.

Desde las partículas más diminutas hasta las estructuras más grandes en el universo, la física desempeña un papel fundamental para la comprensión del mundo que habitamos (Shu, 1982). Gracias a este conocimiento podemos tener una mejor forma de vida, siempre y cuando su resultado sea utilizado para beneficio de las personas.

No obstante, en el laboratorio no siempre pueden cumplirse las condiciones necesarias para observar un fenómeno. Afortunadamente, muchas de las condiciones requeridas para la realización de ciertos «experimentos» se cumplen en las estrellas, las galaxias y demás objetos astrofísicos –incluyendo el «espacio exterior»– (Abbott *et al.*, 2016; The Event Horizon Telescope Collaboration, 2019). Ahora bien, para interpretar de manera cabal los resultados obtenidos se requiere, en muchas ocasiones, conjuntar el conocimiento adquirido en diversas áreas de la física.

Aunado a lo anterior, en ocasiones los jóvenes estudiantes de Física no saben bien a qué área se quieren dedicar. Sin embargo, en la

* Centro Tecnológico, FES Aragón, Universidad Nacional Autónoma de México.

** Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.

mayoría del estudiantado, la seducción de la cosmología es patente. Con ella no solo podemos comprender por qué el universo es como es, sino que, además, es notorio que se deben dominar diversas áreas de las ciencias físicas y de las matemáticas. Esto se debe a que la cosmología es un área multidisciplinaria, y en ocasiones, transdisciplinaria.

Nos ha parecido que, para muchos estudiantes, suele ser difícil aprender cómo manejar los conocimientos derivados de diferentes áreas de la física. Sin embargo, los cursos de Cosmología pueden ser una buena motivación para que estos conocimientos sean llevados a la práctica, combinándolos para la resolución de problemas que suelen presentarse en el estudio del universo. Para esto, se requiere no solo de los conocimientos, sino que además se debe desarrollar la experiencia para buscar en el compendio de estos conocimientos (adquiridos durante la carrera) cuáles de ellos pueden servir para comprender la naturaleza de un fenómeno.

Esta aplicación y manejo de conocimientos puede verse como cierto tipo de «arte». Debemos pensar al arte como un concepto que engloba todas las creaciones realizadas por el ser humano para expresar una visión del mundo. En cosmología se requiere desarrollar la habilidad e inspiración necesarias para que, a partir de las teorías físicas y matemáticas existentes, generemos escenarios congruentes capaces de explicar el universo.

Por otro lado, la experiencia nos ha mostrado que muchas nociones astronómicas resultan indispensables para comprender tanto conceptos generales necesarios para el estudio del universo como los fundamentos de las evidencias observacionales. Por ello, adicionalmente, proponemos la incorporación de una materia de Astronomía General previa a la materia de Cosmología.

En este trabajo, después de exponer algunas razones que soportan la introducción de la Cosmología en los programas de Licenciatura en Física, presentaremos un breve panorama del modelo cosmológico actual y una propuesta para integrar las materias de Astronomía y Cosmología en la etapa final del programa de estudios de la Licenciatura en Física. Expondremos nuestra propuesta de trabajo para abordar el estudio del universo como un todo y de los diferentes eventos que se presentan a lo largo de su evolución. Terminaremos presentando una serie de conceptos y fenómenos astronómicos que nos parecen indispensables para emprender el estudio de la Cosmología.

Desarrollo

1. ¿Por qué estudiar Cosmología en la carrera de Física?

Podemos pensar en muchas razones por las cuales estudiar Cosmología en la carrera de Física. Como respuesta inmediata se nos ocurre que, siendo el universo el lugar y sustento de nuestra existencia, es muy probable que a un futuro físico le interese saber cómo es esto posible, cómo empezamos y hacia dónde vamos, qué hay en la inmensidad que nos rodea o por qué son tan bonitas las galaxias. Como esto atañe a toda la humanidad, y no solo a los físicos, la relevancia de estudiar Cosmología queda de manifiesto.

Una respuesta docente puede ser que el universo nos ofrece un escenario donde recordar, juntar, relacionar y aplicar las distintas áreas del conocimiento físico y matemático adquirido durante la carrera para analizar el funcionamiento de un sistema, pues contiene a todos los ingredientes que podamos conocer. Una motivación académica adicional y a más largo plazo es que esto nos permitiría iniciar a los estudiantes en la investigación. Y, finalmente, con un enfoque dialéctico, nos ofrecería la posibilidad de darnos cuenta, en un trabajo conjunto con los estudiantes, de todo lo que no sabemos e intentar proponer alternativas.

2. Breve panorama de la cosmología

*La naturaleza y las leyes naturales
yacían ocultas en la noche,
dijo Dios: «¡Hágase Newton!».
Y la luz se hizo.*
ALEXANDER POPE

La ley universal de la gravedad de Newton permitió relacionar fenómenos que parecían tan distintos como la aceleración de los cuerpos que caen en la superficie de la Tierra y las órbitas de los planetas en torno al Sol.

A principios del siglo pasado, Einstein aplicó la relatividad general al estudio de la cosmología. Con ello, la cosmología devino de forma definitiva en una ciencia física. Más tarde, con el desarrollo de nuevos instrumentos, el planteamiento de Einstein obtuvo la complementación observacional necesaria y la comprobación de muchas de sus predicciones. Recientemente, hemos presenciado la detección de dos predicciones fundamentales de la relatividad

general: la existencia de un hoyo negro, que apreciamos a través de su sombra, y las ondas gravitacionales (Abbott *et al.*, 2016; The Event Horizon Telescope Collaboration, 2019).

En la actualidad hemos agrupado nuestro conocimiento del universo en algunos modelos. Por un lado, tenemos el Modelo Cosmológico Estándar, en el que se concibe al universo como homogéneo e isótropo, descrito por la relatividad general y constituido por radiación, materia bariónica y materia oscura, así como energía oscura. Como resultado de la dominación de alguno de estos componentes, obtenemos una expansión del universo por momentos frenada y, por otros, acelerada. Estos comportamientos dinámicos alternados del universo son modelados de manera tal que su desarrollo coincida con lo que observamos.

Además, en este modelo hay un momento de la evolución del universo en particular álgido, conceptualmente problemático: la singularidad inicial, el momento en que todo (espacio-tiempo) se creó. La descripción conceptual y matemática de ese inicio es un tema abierto para el que aún no tenemos solución. Así, después de haber reconocido tal dificultad, lo dejaremos por el momento, y casi para siempre, de lado.

Por otro lado, tenemos el Modelo Estándar de Partículas y su aplicación en el campo de la cosmología. Allí tenemos las cuatro fuerzas fundamentales, que nos ayudan a entender muchas cosas, pero que también dejan abiertas varias preguntas, tanto en la física de partículas como en cosmología. Dejemos por ahora de lado los problemas de la primera y enfoquémonos en las grandes incógnitas en cosmología: ¿qué son la materia oscura, necesaria para la formación de la estructura a gran escala, y la energía oscura, responsable de la actual expansión acelerada del universo y/o de la inflación temprana? Además, ¿por qué hay algo en vez que nada? (Cohen, Kaplan y Nelson, 1992). La creación de la materia por encima de la antimateria es todavía un misterio del cual solo tenemos algunos indicios. Si bien logramos definir algunas condiciones necesarias (Sakharov, 1967), hasta ahora no son suficientes.

3. Organización del trabajo con los estudiantes para desarrollar el temario del curso

Una posible dinámica para organizar el curso es desarrollar el trabajo alrededor de las cuatro fuerzas fundamentales.

La gravedad

La principal fuerza a gran escala en el universo es la gravedad. En la descripción de Newton, la fuerza de gravedad se ejerce instantáneamente y a distancia sin que haya un medio físico a través del cual se pueda transmitir su influencia. Él mismo estaba preocupado por esta acción a distancia. Ahora, con la teoría de la relatividad general de Einstein tenemos una visión mucho más natural del fenómeno gravitacional: la deformación del espacio-tiempo. Pensamos que vale la pena elaborar este concepto con los estudiantes para dejar clara la diferencia de enfoques. Una vez hecho esto, se puede, o no, prescindir del término «fuerza» para la gravitación.

Después de discutir el significado de cada término de las ecuaciones de Einstein (Carroll, 2004):

$$G_{\mu\nu} \equiv R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = 8\pi G T_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu} \quad (1)$$

donde $G_{\mu\nu}$ es el tensor de Einstein; $R_{\mu\nu}$, el tensor de Ricci; R , el escalar de curvatura; $g_{\mu\nu}$, la métrica; $T_{\mu\nu}$, el tensor de energía-momento y Λ , la constante cosmológica; estas se pueden aplicar al universo como un todo y obtener una ecuación mucha más sencilla, por ser el universo homogéneo e isótropo:

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{k}{a^2} = \frac{8\pi G}{3} \rho + \frac{\Lambda}{3} \quad (2)$$

Esta es conocida como la ecuación de Friedmann y nos muestra que la tasa de expansión del universo (parámetro de Hubble, $H \equiv \dot{a}/a$, donde a es el factor de escala, la cual es adimensional y solo depende del tiempo) depende de la cantidad y el tipo de energía-materia presente en este (ρ : densidad de materia; Λ : densidad de energía oscura) y de la curvatura intrínseca del espacio-tiempo (k).

Electromagnetismo

El electromagnetismo es la fuerza responsable de todos los procesos radiativos que permiten que nos lleguen las señales luminosas sin las cuales no sabríamos nada del universo. O más bien, casi nada, ahora que se abre la era de información «acústica» (Hughes, 2003; «Siren Call», 2016) a través de las ondas gravitacionales.

Estudiantes con interés por la cosmología observacional podrían encargarse de exponer al grupo los fundamentos de las observaciones que sostienen y validan nuestro modelo.

Fuerzas fuerte y débil

Volviendo hacia atrás en el tiempo en la historia del universo, al tener que lidiar con partículas fundamentales, entran de manera explícita en el escenario las fuerzas fuerte y débil. Así es como los estudiantes interesados en esta rama del conocimiento podrían intentar aplicar la física cuántica que aprendieron y, eventualmente, la teoría cuántica de campos, si tomaron un curso de esta materia, para presentar algunos temas a sus compañeros. En la física de partículas, que echa mano a todas estas ramas de la física, tienen que poder proponer modelos para los diferentes eventos de los «primeros instantes» del universo: inflación, «recalentamiento», bariogénesis, nucleosíntesis, transiciones de fase (QED, QCD), así como para la composición de la materia y la energía oscura.

En este campo nos podemos auxiliar también de los objetos compactos en los que se presentan condiciones similares al universo temprano, pero que están cada vez más al alcance de nuestras observaciones, por lo que se vuelven excelentes laboratorios para el estudio del comportamiento de la materia en condiciones extremas (temperaturas y densidades altas, campos magnéticos intensos, por mencionar algunos). Esta parte del curso puede ser de particular relevancia para los estudiantes con más interés por la astrofísica, tanto teórica como observacional.

Nos referimos a «primeros instantes» entre comillas, pues los primeros instantes (sin comillas) son difíciles de ubicar en el espacio-tiempo, sabemos que para acercarnos a ellos necesitamos de la gravedad cuántica, pues allí se presentan condiciones extremas: partículas elementales en presencia de una gravedad muy intensa. Pero, hasta la fecha, no hemos logrado construir esta teoría. Aquí se trataría solo de reconocer la necesidad de su desarrollo.

Otras disciplinas

Transversalmente a todo esto tenemos la termodinámica y la mecánica estadística, que desempeñan un papel fundamental en nuestro entendimiento de la evolución del universo, a través de su historia térmica. Por otro lado, sobra decir que para todos estos estudios nece-

sitamos cálculo, geometría, trigonometría y ecuaciones diferenciales. La materia ofrecería una excelente oportunidad para repasar y aplicar estas disciplinas.

Estudiantes con habilidades computacionales podrían interesarse en estudiar los códigos libres que describen la evolución de las fluctuaciones cuánticas primordiales hasta la liberación de la radiación cósmica de fondo y/o algún código N-cuerpos de formación de estructuras. En estos se pueden realizar pequeñas modificaciones para explorar el efecto de los parámetros cosmológicos.

Finalmente, aquellos estudiantes con aptitud e interés por la estadística podrán verificar la importancia de aplicar algún programa Monte Carlo a los datos del espectro de la radiación cósmica de fondo para estimar los parámetros cosmológicos de mejor ajuste.

Después de revisar los conceptos básicos y más generales, esta abrumadora cantidad de temas se podría cubrir a lo largo del semestre con diferentes equipos de trabajo que agruparían a los estudiantes según sus áreas de interés. Después de profundizar en el tema correspondiente, podrían realizar algún ejercicio que los encamine a la investigación. Los diferentes equipos irían presentando los temas al resto de sus compañeros, quienes ya habrían leído sobre estos.

4. La necesidad de la Astronomía

La cosmología ha probado ser una de las disciplinas que mejor muestra la capacidad de desarrollo de las teorías físicas. Tal como ha sido desarrollada en los últimos cien años, con el uso de la teoría de la relatividad, es una de las piezas fundamentales del área de la astronomía. Las predicciones realizadas desde su surgimiento hasta las observaciones más recientes (Einstein, 1915; Abbott *et al.*, 2016; The Event Horizon Telescope Collaboration, 2019) muestran la necesidad de incluirla en la preparación de científicos en ciernes.

Una situación común en cualquier área del conocimiento es la comprensión y utilización del «lenguaje» que se emplea como parte del aprendizaje de la disciplina en cuestión. Es así en el área de la cosmología. Sin embargo, es necesario notar que el lenguaje utilizado en esta disciplina es el mismo empleado en la astronomía; proviene de allí. Conceptos como supernovas «galaxias», «estrellas», «espectro electromagnético», etc., son utilizados y desarrollados de manera común en astronomía.

De aquí surge la necesidad de tener un marco de referencia que permita comprender de forma adecuada magnitudes tales como

distancias, masas de galaxias y cúmulos de galaxias, tiempos, etc. Por ello, es necesario que el estudiante pueda manejar relativamente bien estos conceptos que surgen de manera reiterada en cosmología. Al manejar el «lenguaje astronómico», quien quiera adentrarse en el área de la cosmología podrá comprender con mayor facilidad fenómenos más complejos, y que requieren conocimientos más básicos.

Por ello, proponemos que, al incorporar un curso de Cosmología en una carrera de Física, como primera fase, se requiera un curso de introducción a la Astronomía. En este curso, que podría incorporarse hacia la mitad de la carrera, cuando los estudiantes han cursado las materias básicas y son capaces aplicar muchos de los conocimientos adquiridos, se pueden introducir los principios básicos de la física y matemática utilizadas en el estudio del universo.

Podría parecer que consideramos la astronomía solo como un área de aplicación de conocimientos físicos, por lo que subrayamos que en ella se desarrollan conceptos propios (Osterbrock y Ferland, 2006; Shu, 1982). De hecho, la astronomía es una de las ciencias más antiguas que existen, habiendo nacido junto con la humanidad. Al mismo tiempo, sabemos que el desarrollo de la astronomía está íntimamente ligado con el desarrollo de otras áreas de la física.

Con esto en mente, mencionamos a continuación una serie de conceptos y fenómenos astronómicos que nos parecen indispensables para adentrarnos en la cosmología. Algunos de ellos se han desarrollado de la mano de otras áreas de la física y otros nacen en el seno de la astronomía.

Uno de los primeros conocimientos necesarios es comprender la manera en que se miden las distancias, se estiman las masas, se acotan los tiempos. En astronomía debemos tratar con distancias enormes, con objetos muy grandes y escalas de tiempo muy largas. El sistema de unidades SI resulta inconveniente. Por ello, se utilizan diferentes sistemas de medidas, por lo que es necesaria cierta familiarización. Para estas estimaciones, los astrónomos debemos saber cómo se genera la luz y cómo se detecta. Debemos saber todo lo referente a los procesos radiativos; tres mecanismos muy importantes son la dispersión de Thomson, el efecto Compton y el efecto Compton inverso.

En astronomía requerimos de herramientas fundamentales para saber cómo medir los diferentes aspectos de los astros y estructuras en el universo. Por ello, en los cursos de astronomía se habla, de ma-

nera coloquial, de «caballitos de batalla de la astronomía», para hacer referencia a ciertos conocimientos básicos ineludibles para una comprensión mínima del cosmos. Tres de los más importantes «caballitos de batalla» son los conceptos del «módulo de distancias», la «ecuación de transporte radiativo» y las «leyes de Kirchhoff de la transmisión radiativa» (Shu, 1982; Karttunen *et al.*, 1996).

Otro concepto fundamental para un curso completo de astronomía es la «masa de Jeans», necesaria para estudiar la formación de estructuras. El estudio de las galaxias es esencial tanto en astronomía como en cosmología; en el primer caso se caracteriza su estructura y su evolución, en el segundo se busca entender su formación y evolución. Las galaxias son por sí mismas espectaculares, pero además son las estructuras básicas del universo. Vivimos en una de ellas y, por más lejos que observemos, nos encontramos con un universo repleto de galaxias. Al estudiarlas, hallamos diversos fenómenos físicos que por sí mismos son fascinantes. Por si fuera poco, son las estructuras con las que «mapeamos» las coordenadas del espacio-tiempo. Es mediante el estudio de las galaxias que muchas de las propiedades del universo son analizadas.

Finalmente, un descubrimiento medular para la cosmología es la determinación de la expansión del universo. Si bien la noción inicial de este fenómeno surgió en el seno de la relatividad general, los primeros elementos que le dan sustento son las observaciones realizadas por Slipher a principios del siglo xx. Tales observaciones fueron necesarias para que Hubble lograra completar su trabajo referente a lo que hasta hace poco se conocía como «ley de Hubble». Asimismo, fueron utilizadas por Lemaître para comprobar lo que se obtenía de las ecuaciones derivadas de la teoría de Einstein (Lemaître, 1927; Luminet, 2013; International Astronomical Union, 2018; Elizalde, 2019). Si bien Hubble se ha llevado el crédito histórico de haber descubierto la expansión del universo, en realidad fue Lemaître. Por ello, a finales del año pasado se propuso, y ha sido aprobado por la mayoría de los astrónomos, renombrar la ley de Hubble como ley de Hubble-Lemaître. Algunos astrónomos incluso han propuesto llamarla ley de Hubble-Lemaître-Slipher («Siren Call», 2016).

En el campo de la expansión del universo, otro conocimiento básico para los cosmólogos es que con el estudio de supernovas (SN) se ha logrado determinar que el universo se encuentra en expansión

acelerada. Por tanto, se requiere saber qué es una SN, lo que corresponde al ámbito de la astronomía.

Si bien los conceptos y fenómenos que hemos mencionado no son lo único necesario para comprender el universo, sientan las bases necesarias para cualquier estudio de astronomía.

Hemos pensado que, en el curso que proponemos, se podría abordar los conceptos desde sus orígenes, pues muchos de ellos en ocasiones parecen haber sido elegidos de manera caprichosa. Conocer su origen y que su elección corresponde a las necesidades del momento en que se propusieron puede dejar claro por qué se utilizan en la actualidad.

En resumen, la astronomía por sí misma es fascinante, pues con ella podemos estudiar el origen y desarrollo de las estrellas y galaxias; pero también nos encamina al estudio del origen y evolución del universo. Además, ofrece un buen laboratorio para estudiar física, desde el sistema solar, pasando por las estrellas, los objetos compactos, las estructuras a gran escala, hasta las teorías del origen del universo.

Discusión y conclusiones

Consideramos la necesidad de un curso de Cosmología en las etapas finales de la Licenciatura en Física. En él, los estudiantes podrán hacer uso de los conocimientos que han adquirido durante su carrera.

En el desarrollo del curso, de acuerdo con el diseño que presentamos, podría establecer una relación entre las áreas cosmológicas y de física de partículas. Los resultados más avanzados en el estudio del cosmos muestran la posibilidad de que en un futuro cercano se logre establecer la conexión definitiva entre las teorías cuánticas y relativistas que puedan dar explicación a las principales dificultades de las teorías cosmológicas, como lo es la naturaleza de la singularidad inicial.

Así, con base en los conocimientos que los estudiantes obtengan en sus cursos previos, las habilidades necesarias para conjugarlos se desarrollarían al presentar un panorama general de la cosmología, seguido de un enfoque cuántico de los fenómenos más relevantes. Por supuesto, el trabajo en equipo suele ser útil para una mejor asimilación de los conocimientos que se van adquiriendo y, aunque no se hace obligatorio, sí se privilegia el trabajo en conjunto.

Además, estimamos que es necesario un curso de Astronomía General previo a uno de Cosmología. Este curso favorecerá el desempeño de los estudiantes en la utilización de conceptos de la cosmología, así

como del lenguaje básico requerido para enfrentar problemas conceptuales más complejos.

La detección de ondas gravitatorias y la observación de la «sombra» de un agujero negro muestran la posibilidad de descubrimientos y observaciones que hace cien años parecían imposibles. Por ello, es necesario preparar a los estudiantes de acuerdo con la posibilidad de conjuntar lo que sabemos de fuerzas básicas con la teoría de la relatividad.

Para lograr lo anterior, los estudiantes requieren de un aprendizaje en el uso de las diferentes disciplinas del conocimiento físico. A manera de «arte», se vuelve indispensable desarrollar la intuición en el momento de manejar estas áreas, para establecer los escenarios que puedan resolver los problemas más sobresalientes en cosmología. Todo ello es posible realizarlo en un curso de Cosmología.

Bibliografía

- ABBOTT, B. P. *et al.* (2016): «Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger», *Physical Review Letters*, vol. 116, n.º 6, February, <<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.116.061102>> [22/4/2019].
- CARROLL, S. M. (2004): *An Introduction to General Relativity, Spacetime and Geometry*, San Francisco: Addison Wesley.
- COHEN, A. G.; D. B. KAPLAN y A. E. NELSON (1992): «Why there is Something Rather than Nothing: Matter from Weak Interactions», *Nuclear Physics B*, vol. 373, n.º 2, April, pp. 453-478.
- EINSTEIN, A. (1915): «Die Feldgleichungen der Gravitation», en *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften*, Berlin: Deutsche Akademie der Wissenschaften, pp. 844-847.
- ELIZALDE, EMILIO (2019): «Reasons in Favor of a Hubble-Lemaître-Slipher's (HLS) Law», <<https://arxiv.org/pdf/1810.12416.pdf>> [22/4/2019].
- HUGHES, S. A. (2003): «Listening to the Universe with Gravitational-Wave Astronomy», *Annals of Physics*, vol. 303, pp. 142-178.
- INTERNATIONAL ASTRONOMICAL UNION (IAU) (2018): «IAU Members Vote to Recommend Renaming the Hubble Law as the Hubble-Lemaître Law», <<https://www.iau.org/news/pressreleases/detail/iau1812/>> [22/4/2019].
- KARTTUNEN, H. *et al.* (1996): *Fundamental Astronomy*, Berlin and Heidelberg: Springer-Verlag. 3rd edition.
- LEMAÎTRE, G. (1927): «Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses

- extra-galactiques», *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*, A47, pp. 49-59.
- LUMINET, JEAN-PIERRE (2013): «Editorial Note to “A Homogeneous Universe of Constant Mass and Increasing Radius Accounting for the Radial Velocity of Extra-Galactic Nebulae” by Georges Lemaître (1927)», <<https://arxiv.org/pdf/1305.6470.pdf>> [22/4/2019].
- OSTERBROCK, D. E. y G. J. FERLAND (2006): *Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei*, Sausalito, California: University Science Books. 2nd edition.
- RYDEN, B. (2003): *Introduction to Cosmology*, San Francisco: Addison Wesley.
- SCHUTZ, B. F. (2009): *A First Course in General Relativity*, New York: Cambridge University Press.
- SAKHAROV, A. D. (1967): «Violation of CP Invariance, C Asymmetry, and Baryon Asymmetry of the Universe», *JETP Letters*, vol. 5, January, pp. 24-27.
- SHU, F. H. (1982): *The Physical Universe. An Introduction to Astronomy*, Mill Valley, California: University Science Books.
- «SIREN CALL» (2016), *Nature*, vol. 531, March, pp. 413-414.
- THE EVENT HORIZON TELESCOPE COLLABORATION (2019): «First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole», *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 875, n.º 1, April, <<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/ab0ec7>> [22/4/2019].
- WEINBERG, S. (2008): *Cosmology*, New York: Oxford University Press Inc.



El estudio de las ciencias espaciales con el apoyo de las TIC

JUAN GUSTAVO KESSEL RODRÍGUEZ,* BEATRIZ CONSUEGRA LEZCANO,** ERNESTO MILLARES RODRÍGUEZ,*** JORGE MAZORRA ACUAY*

Introducción

Las condiciones que determinan los cambios sistemáticos en los planes de estudios dirigidos a la formación de profesionales están relacionadas, en primer término, con los ritmos acelerados de la ciencia en cuanto a la obtención de nueva información sobre el universo que se investiga. La acumulación enorme de datos y el rápido envejecimientos de la información hacen necesario establecer vías de actualización sistemática de la información. En tal sentido las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) desempeñan un importante papel.

Este trabajo muestra una página web interactiva que ofrece la posibilidad de integrar los resultados más notables de la astrofísica y las investigaciones del cosmos en los cursos de Física que se imparten en la educación superior. En la confección de este material se integran las bases históricas del desarrollo de las ciencias espaciales, con el propósito de establecer la vía para su perfeccionamiento. Se indica cómo el estudio del cosmos permite generalizar e integrar conocimientos de diferentes áreas de la física y del resto de las ciencias, elemento vital para la formación de los futuros profesionales de las ciencias técnicas y pedagógicas y, a la vez, un modo de actualización sistemática del contenido de la disciplina.

* Facultad de Educación, Universidad de Matanzas, Cuba.

** Facultad de Ciencias Técnicas, Universidad de Matanzas, Cuba.

*** Departamento de Desarrollo de Recursos para el Aprendizaje, Universidad de Matanzas, Cuba.

La página web interactiva se propone un óptimo aprovechamiento del potencial científico y metodológico de la Física General, así como la vinculación con los hechos de la realidad siguiendo la lógica de la ciencia y su aplicación consecuente con fines docentes. Como propósito en este proceso de asimilación se ha de conformar un cuadro integral de los conocimientos físico-astrofísicos que respondan a las exigencias del desarrollo científico contemporáneo, de modo que se evidencie la interrelación entre los elementos vinculados a los principios que deben observarse para la modernización y el perfeccionamiento de la disciplina.

Desarrollo

Dirigir con óptima eficiencia la preparación de los futuros profesionales, que han de asimilar los beneficios de la revolución científica y enfrentar los nuevos retos, es una tarea de las didácticas específicas y generales, por lo que se le dedica gran atención a la modernización y actualización de la enseñanza superior.

El perfeccionamiento de la Física General no está exento de esta labor. Los actuales programas para la impartición de esta disciplina recogen elementos de astrofísica, pero de manera aislada en todas las asignaturas, sobre todo en la Física III. Las condiciones señaladas imponen a los docentes nuevas tareas a fin de lograr que en la estructuración de los nuevos planes se reflejen los logros, métodos y procedimiento de las investigaciones espaciales más recientes, dando un peso relativo de la aplicación práctica de los métodos de trabajo de la ciencia del cosmos, sin dejar de atender el principio de asequibilidad del contenido. Las condiciones objetivas en las que se desarrolla la disciplina Física General son potencialmente favorables para asimilar el cambio que requiere la elaboración del nuevo contenido, que presume un enfoque físico en cuanto al tratamiento de los temas dedicados al estudio del universo. Estas premisas son necesidades objetivas; se debe vincular la enseñanza-aprendizaje de los contenidos astrofísicos a la disciplina de Física General de las carreras de ciencias técnicas, en correspondencia con los niveles de desarrollo que han alcanzado la pedagogía y las ciencias del espacio.

De acuerdo con lo anterior, se elaboró una página web interactiva para la enseñanza-aprendizaje de la Física General en la educación superior. El uso de este recurso para el aprendizaje permite, de forma

interactiva y didáctica, integrar y sistematizar los contenidos de Astrofísica al proceso de enseñanza-aprendizaje de la Física General, desde una óptica interdisciplinar, lo que contribuyen a elevar la motivación profesional y la vinculación de la Física a las nuevas tecnologías, al medioambiente y la sostenibilidad del planeta Tierra. Todos estos son aspectos fundamentales para la formación de los egresados universitarios.

Este recurso de aprendizaje incorpora los resultados científicos relevantes y novedosos derivados de los éxitos de las investigaciones espaciales, historia de la astronomía, juegos, curiosidades, efemérides, bibliografías, entre otros aspectos, recogidos en un menú principal (figura 1) que a su vez está constituido por un submenú.



Figura 1. Menú principal de la página web.

Del menú principal «Física del Sistema Solar» se puede accionar el submenú «Sistema Solar» (figura 2) y dentro de esta información existe la opción Leer +, que permite acceder a otros textos que amplían la información sobre los temas; un ejemplo se muestra en la figura 3.



Figura 2. Submenú «Sistema Solar».



Figura 3. Opción Leer +: energía solar fotovoltaica.

Esta página web fue utilizada en la Universidad de Matanzas para la preparación individual de los estudiantes y profesores en la enseñanza-aprendizaje de la Física General en las dimensiones motivación profesional, aplicaciones de la física, las nuevas tecnologías y el medioambiente, esta última referente a la sostenibilidad del planeta.

1. Aspectos históricos sobre el universo y el desarrollo científico contenidos en la página web

Del menú principal «Astronomía» se puede accionar el submenú «Historia de la astronomía» (figura 4), en el que se recogen variadas temáticas. En el contenido de la parte histórica puede obtenerse información como la que se presenta en lo adelante, a modo de ejemplo:

En el siglo IV la Iglesia Cristiana condujo el fanatismo religioso a la destrucción de la Biblioteca y el Museo de Alejandría. En esa oportunidad, a instigación del obispo local, fue despedazada por una muchedumbre de creyentes Hipatia; todo pensamiento que amenazara al geocentrismo de Claudio Ptolomeo, el cual fue aceptado por el Clero como centro de su ideología, corría igual suerte que Hipatia. La obra de Copérnico libró numerosas batallas hasta imponerse definitivamente, constituyó un punto cardinal para el desarrollo de las ciencias. El 24 de mayo de 1543 la majestuosa y brillante obra «De Revolutionibus Mundus» sale a la luz, esta representa la fundamentación matemática de la teoría heliocéntrica y en ella se fomentó la base para la independencia moderna entre ciencia y religión, la interpretación materialista objetiva de los fenómenos naturales. Engels (1979), al referirse a ese hombre y su obra, apuntó: «el sabio polaco lanzó un reto a la autoridad eclesiástica en los problemas de la naturaleza. Con él empieza a contarse el tiempo transcurrido desde la emancipación de las ciencias naturales de la teología» (p. 255).



Figura 4. Submenú «Historia de la Astronomía».

El heliocentrismo debió librar una gran lucha, que permitiera emancipar la ciencia del fanatismo religioso, lucha que libraron los gigantes del renacimiento y que condujo a Galileo al tribunal inquisidor y a Bruno a la hoguera; este señaló las limitaciones de la teoría de Copérnico acerca de la finitud del universo y la transferencia de su centro al Sol, elaboró los criterios sobre la multiplicidad de los sistemas cósmicos y la probable coexistencia de civilizaciones en el universo, lo cual desató la furia de los inquisidores, que los condenaron.

El arsenal de datos heredados de las observaciones de Ticho Brahe posibilitó a Johannes Kepler formular las leyes cinemáticas generales que regulan el movimiento de los cuerpos en sus órbitas. En 1687 Isaac Newton, en gran medida a partir de esas tres leyes, formula la ley de gravitación universal, que constituye una de las leyes fundamentales de la naturaleza, y se desarrolló un modelo de la estructura del sistema solar coherente plenamente con las observaciones e investigaciones más precisas. Nacían así la mecánica celeste y la astronomía clásica.

La evidencia de estos acontecimientos demuestra que el primer laboratorio en manos de estos hombres de ciencia fue la naturaleza, y de ella, los complicados movimientos de los objetos celestes y la posición que ocupamos en el sistema. Estos procedimientos tienen un alto valor gnoseológico y didáctico para formar las representaciones actuales sobre nuestro mundo. La Tierra es un minúsculo planeta comparado con el universo; formamos parte del sistema solar perdido en un brazo de una galaxia que tiene cien mil millones de estrellas, pero solo es una entre los centenares de miles de millones de galaxias que forman el universo.

Las relaciones feudales de producción sustituyeron la esclavitud. Explican Bakulin y Marov (1966) que «la brújula en esa época tuvo un papel fundamental, las largas travesías planteaban nuevas exigencias en la precisión de los instrumentos y métodos astronómicos de orientación y cálculo de posición, estas necesidades, unidas al nivel de complejidad del sistema de Ptolomeo, constituyeron las premisas para cambiar de un modo radical las representaciones geocéntricas del universo» (p. 102). El comercio alcanzó un auge extraordinario en toda la Europa medieval y se abre un nuevo período de la historia, la época del Renacimiento. Durante los siglos XV y XVI se realizaron los viajes de descubrimiento y conquista de América, así como la circunvalación de la tierra por la escuadra de Magallanes; se crean las condiciones y las herramientas para que se generalicen los estudios de la Física.

2. Principales temas a integrar a Física General en el contexto de las ciencias espaciales abordados en la página web

La opción «Física del Universo» contiene un submenú temático, que se muestra en la figura 5.



Figura 5. Ejemplo del submenú temático «Física del Universo».

En los tiempos de Newton se consideraba que en el universo el rol determinante lo desempeñaba la interacción gravitacional. La física de los rayos cósmicos ha puesto en evidencia esta conclusión, pues en determinadas etapas del desarrollo de los objetos celestes el carácter de la influencia de las restantes interacciones puede ser fundamental. Uno de los problemas cardinales de la astronomía, y en particular de la cosmogonía, es el del origen y evolución del sistema solar, un tema clásico de las ciencias naturales. En las últimas décadas se ha prestado gran atención al problema gaso-dinámico, a la interacción del campo magnético con la sustancia estelar, así se pone de manifiesto cómo en las cuestiones relativas a la evolución estelar está latente la física del plasma.

Existe otro círculo de problemas en los que el papel de la física es muy activo, se trata de la dinámica de la atmósfera, un problema global muy interesante y de significación especial para nuestro planeta por estar habitado. Las fundamentaciones acerca del origen y la evolución de las atmósferas planetarias tienen vigencia hoy, pues no todos los aspectos cosmogónicos están resueltos. Los estudios de esta índole tienen un profundo impacto medioambiental, en ellos se establece el análisis de la interrelación con la actividad solar, en particular la influencia del viento

solar en el campo magnético terrestre y la biosfera, así como las posibles causas del efecto invernadero y sus consecuencias.

De estos estudios se ha conformado el cuadro mecánico del sistema, que incluye elementos de la teoría de los gases y la radiación, utilizados al tratar los aspectos sobre la estabilidad del disco pre-estelar que originó el sistema. La hipótesis sobre su formación, la fuente de energía inicial de la protoestrella y la diferenciación en la composición química sobre la base de la distribución de masa, son argumentos que se tratan en los diferentes programas de estudio y que se fundamentan, en el mejor de los casos, con un enfoque de laboratorio o teórico al margen de las evidencias naturales.

Este círculo de problemas generales responde en buena medida a la mecánica, a sus leyes de conservación fundamentales y a la gravitación, por esta razón los criterios clásicos que hoy perviven en la astronomía deben ser valorados suficientemente. La mecánica celeste, que de una forma u otra está involucrada en este círculo de problemas, representa un momento cumbre en el desarrollo de la ciencia y la historia de la astronomía y de los hombres que la desarrollaron. Galileo, Copérnico, Kepler, Newton, entre otros «ilustran como el mejor de los ejemplos la unidad indisoluble de los problemas físicos y astronómicos» (Marov, 1985, p. 292).

Como se señala en *La Enciclopedia galáctica*, las estrellas son los objetos más difundidos en el universo, más del 98 % de la masa de la sustancia cósmica está concentrada en estos cuerpos gaseosos. La formación de muchos elementos químicos está ligada a la evolución de las estrellas, eslabón importante en el desarrollo de la materia. Los métodos de la astrofísica posibilitan estudiar las condiciones físicas de las estrellas, tanto interiores como exteriores, se determinan por su masa, luminosidad y radio. Por esta vía se resuelve un círculo amplio de problemas sobre estos cuerpos cósmicos, y a la vez, se desarrollan interesantes modelos estelares que generalizan los resultados de observaciones sobre su evolución.

En la construcción del modelo solar intervienen diferentes áreas de la física, en particular, mecánica, teoría cinético-molecular (TCM) y radiación térmica, física nuclear y cuántica. Además, se toma en cuenta el carácter de las interacciones y los mecanismos de generación y transporte de energía, se establecen los criterios para evaluar los estadios de las diferentes fases evolutivas y tiempos de vida de los sistemas estelares. A causa de la atracción gravitatoria, la materia de las estrellas tiende a concentrarse en su centro, aumenta la temperatura y presión,

a partir de ciertos límites este aumento provoca reacciones nucleares que liberan energía y equilibran la fuerza de gravedad, con lo que el tamaño de la estrella se mantiene más o menos estable durante un tiempo, emitiendo grandes cantidades de radiación. El estudio del Sol tiene un alto valor científico metodológico, con ello se ha conformado un cuadro general para el estudio del resto de las estrellas.

En 1905 el astrónomo Danés Ejnar Hertzsprung descubrió un patrón regular al relacionar la magnitud absoluta con el color de una estrella, dos años después Henry Russell descubrió una relación similar cuando estudiaba los tipos espectrales y el color de las estrellas. De esto resultó el diagrama de Hertzsprung y Russell o H-R. La figura 6 muestra una imagen del diagrama (Rivero, 2015).

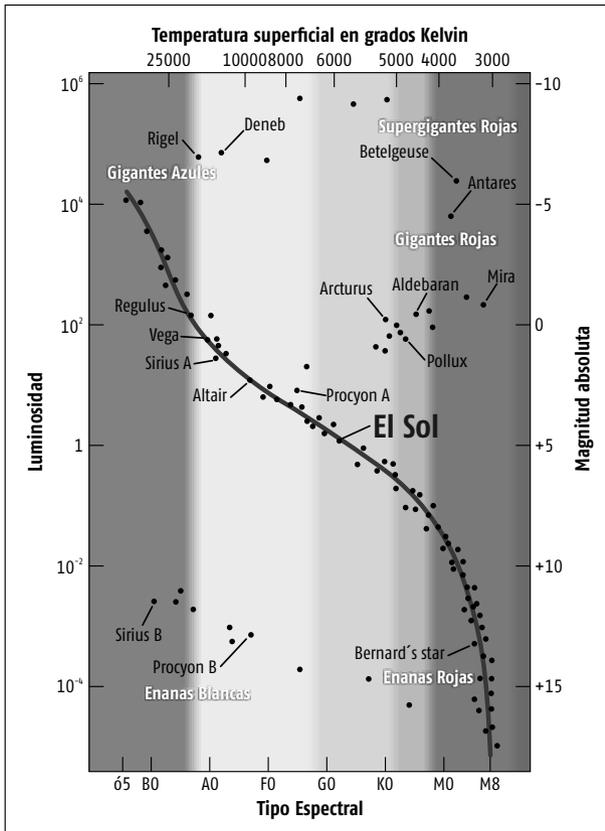


Figura 6. Digrama H-R.

Fuente: Rivero (2015).

A este diagrama se le adicionó posteriormente el color y la temperatura. Su estudio permite, entre otras cosas, conocer la historia de la evolución estelar, edades de las estrellas y distancias a los cúmulos estelares.

Para el estudio del universo y las partículas se han diseñado diversos modelos: clásico, caliente y estándar. A estos se les asocian determinadas bases: distribución de masa, interacciones y grupos de partículas.

Estos modelos reflejan de forma adecuada los principales acontecimientos del universo y se ajustan al contenido de Física General y Teórica. Es muy difícil aislar cualquiera de estos componentes que sustentan los modelos y cada uno de ellos interviene en su descripción y conclusiones.

La evolución del universo es descrita por una teoría que denominamos «Modelo de la gran explosión» (descripción de la expansión del universo, origen de los elementos más ligeros –núcleo-síntesis–, radiación de fondo cósmico –CMB–, marco teórico para entender la formación de galaxias y otras estructuras de gran escala). Este modelo es soportado por tantas pruebas experimentales que también se le conoce como «Modelo estándar cosmológico».

Este tema se abarca en la última parte de Física III, correspondiente al plan de estudios D en las carreras de ciencias técnicas, y en un semestre para las ciencias pedagógicas. Es muy importante este primer acercamiento desde los planes de estudios, aunque se logra solo una parte de lo que puede significar la astrofísica en la formación de los profesionales.

A continuación se trata el sistema de principios y los resultados logrados, una vez que los contenidos astrofísicos se integran a la enseñanza-aprendizaje de la Física General en la carrera de Ingeniería Industrial de modo sistemático.

3. Sistema de principios para la confección de los materiales didácticos sobre Física General e investigaciones espaciales en la educación superior

Este sistema de principio se elaboró después de un profundo análisis y estudio sobre los problemas didácticos de la educación superior contemporánea, pues no existe un criterio establecido sobre los aspectos que determinan el perfeccionamiento de esta disciplina a través de la integración del contenido astrofísico.

El sistema de principios responde a la necesidad de articular y aplicar los elementos que garanticen la integración del contenido astrofísico en la enseñanza-aprendizaje de la Física General, y reafirmen la aplicabilidad de las TIC, los conocimientos físicos y tecnológicos a escala del universo, la gestión ambiental y la motivación profesional como fundamentos para el perfeccionamiento y la modernización del contenido de las disciplinas. Estos son los principios:

1. Principio de sistematización y generalización del material astrofísico atendiendo al enfoque físico de los temas.
2. Principio de correspondencia entre el nivel de desarrollo de las TIC, la astrofísica y el nivel de profundidad del contenido de la disciplina Física General, atendiendo a los métodos de investigación y de las tecnologías necesitadas.
3. Principio sobre la formación de representaciones concretas sobre los objetos y fenómenos del cosmos, el medioambiente y su contribución a la formación del cuadro físico del mundo.
4. Principio sobre la evolución histórica de las ciencias y la contribución social de la astrofísica y las TIC.

El sistema de principios señalados se aplicó durante tres semestres en la carrera de Ingeniería Industrial. Atiende particularmente las condiciones del desarrollo de la astronomía y su esfera más dinámica, la astrofísica; las consideraciones didácticas para la estructuración y actualización de las TIC en el contexto de la disciplina Física General en el plan de estudios vigente, que guían las acciones de profesores y estudiantes en correspondencia con las diferentes formas de organización del proceso docente educativo.

4. Resultados derivados de la aplicación de la página web

Los resultados derivados de la aplicación de la página web durante tres semestres en la carrera de Ingeniería Industrial (Kessel, 2015) evidencian su factibilidad, al comparar los niveles de asimilación de los contenidos de Física General y Astrofísica logrados durante la enseñanza-aprendizaje en los grupos experimental y de control (figura 7).

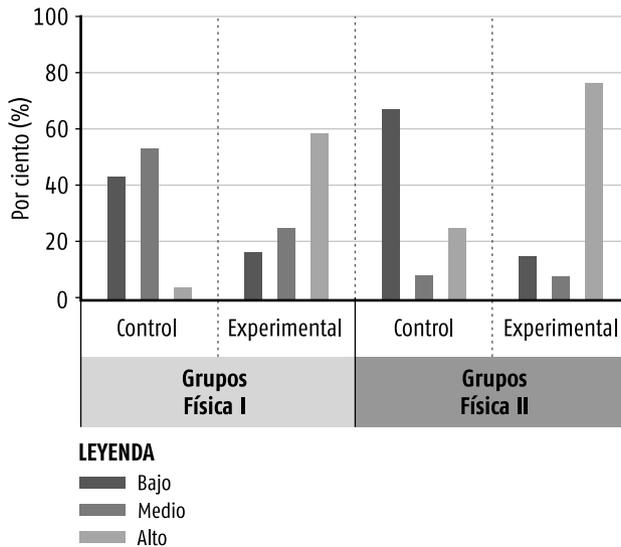


Figura 7. Indicadores de la dimensión «aplicación».

Los siguientes son los indicadores de la dimensión «aplicación»:

- Nivel de evidencia de las aplicaciones físicas y tecnológicas relativas a las ciencias espaciales en las clases de Física.
- Conocimientos sobre las aplicaciones de las ciencias espaciales y el desarrollo.
- Nivel de integración de las aplicaciones físicas, astrofísicas y tecnologías.

Los resultados muestran diferencias entre los grupos que se comparan, las tendencias son contrarias; en el grupo control decrece la proporción de estudiantes hacia el nivel alto y crece en el grupo experimental, mientras que se agudiza la diferencia en los niveles bajo y alto. Esto confirma que los estudiantes del grupo experimental adquieren los conocimientos y habilidades que se corresponden con los indicadores de esta dimensión –a través de la enseñanza-aprendizaje de la Física General–, que se refiere a evidencias y conocimientos integrados de las aplicaciones físicas y tecnologías relativas a las ciencias espaciales desde su formación académica como resultado de la aplicación de las TIC.

Conclusiones

En los grupos donde el contenido de Física General se fundamenta en la integración de las TIC y los conocimientos y habilidades de Astrofísica se logra que una proporción mayor de estudiantes expresen niveles superiores de conocimientos referidos a las aplicaciones físicas y tecnológicas en el estudio del universo. El convencimiento sobre la generalización de las leyes de la naturaleza logradas en condiciones terrestres y su aplicación consecuente a otros sistemas tiene un gran valor gnoseológico. Las bases metodológicas y el sistema de contenidos que establecen los diferentes programas de Física para la formación de profesionales en las diferentes áreas de actuación en la educación superior, en una parte significativa, son compatibles con los niveles de conocimientos que se han derivado de las investigaciones de los sistemas estelares. Estos contenidos posibilitan integrar el sistema de conocimiento y habilidades de la Física como un todo, al abordar el tratamiento de los diferentes temas relativo a su objeto de estudio a través de las TIC.

Bibliografía

- BAKULIN, P. I y M. I. MAROV (1966): *Curso de Astronomía General*, La Habana: Editorial Ciencias.
- ENGELS, F. (1979): *Dialéctica de la naturaleza*, La Habana: Editora Política.
- KESSEL, J. G. (2015): «Estrategia didáctica para el desarrollo de la cosmovisión en los estudiantes de la carreras de Ingenierías», tesis de doctorado, Departamento de Física, Universidad de Matanzas, <<http://cict.umcc.cu/>> [13/11/2018].
- La Enciclopedia Galáctica*, <<https://laenciclopediagalactica.info>> [14-10-2018].
- MAROV, M. I. (1985): *Planetas del sistema solar*, Moscú: Editorial MIR.
- RIVERO, A. (2015): «La clasificación estelar», *Astrobitácora. Noticias de astronomía*, <<https://www.astrobitacora.com/la-clasificacion-estelar/>> [13/11/2018].



Webmedia de Astronomía para niños de enseñanza primaria

MARGARITA LIBERTAD MIRANDA DEL REAL,* ERNESTO MILLARES RODRÍGUEZ,* LEONARDO CECILIANO HERNÁNDEZ,** JUAN KESSEL RODRÍGUEZ***

Introducción

En los planes de estudio de la enseñanza primaria en Cuba, los alumnos deben desarrollar habilidades que le permitan conocer el mundo que les rodea y en particular la naturaleza. La asignatura encargada de tal propósito es, de primero a cuarto grados, El Mundo en que Vivimos, y en los grados cuarto y quinto, Ciencias Naturales. Mediante ambas adquieren sus primeros conocimientos de la existencia de los planetas, las galaxias, los satélites, la formación del universo, entre otros temas que, sin dudas, resultan de interés para los niños y que, de ser tratados en correspondencia con el desarrollo psicológico de sus edades, influyen notablemente en la formación integral que se espera de un joven y un adulto de esta época. Esta formación, como señala Escribano (2016), debe estar en concordancia con la concepción de José Martí sobre la educación: «Educar es depositar en cada hombre toda la obra humana que le ha antecedido: es hacer a cada hombre resumen del mundo viviente, hasta el día en que vive: es ponerlo a nivel de su tiempo, para que flote sobre él, y no dejarlo debajo de su tiempo, con lo que no podrá salir a flote; es preparar al hombre para la vida».

A menudo los profesores universitarios responsabilizan a las enseñanzas precedentes de las insuficiencias con que llegan los estudiantes a nuestras aulas, sin tener en cuenta que la universidad puede contribuir a la formación científica si se integra de algún modo

* Departamento de Recursos para el Aprendizaje, Universidad de Matanzas.

** Departamento de Ingenierías, TecNM / Tecnológico de Toluca, México.

*** Departamento de Física, Universidad de Matanzas.

a estas. Desde las edades tempranas se puede incentivar el interés por la ciencia, ya que es precisamente en la enseñanza primaria donde los alumnos, por las características de sus edades, están ávidos de saber y son más desprejuiciados en el momento de emitir criterios o formular preguntas acerca de los fenómenos circundantes.

Los autores de este trabajo, permeados de este sentir, proponemos un recurso informático dirigido a los estudiantes de la enseñanza primaria que sienta las bases del conocimiento de la astronomía, con contenidos que tienen puntos de contacto con los currículos de tercero a sexto grados.

El recurso se diseñó y elaboró en Webmedia 2.4, que es una cadena editorial para la estructuración y enriquecimiento de recursos audiovisuales y sonoros. Para lograr este propósito, se recopiló de información de libros digitales, animaciones, videos, entre otras fuentes dedicadas a las edades comprendidas entre los 7 y 11 años, que corresponden a la enseñanza primaria.

Este recurso informático se utilizó en la escuela primaria Francisco Vega Alemán, del reparto Playa (municipio de Matanzas), en un círculo de interés, bajo la asesoría de los autores y con la colaboración de los maestros de Ciencias Naturales y una maestra del primer ciclo.

Desarrollo

Vivimos en una época en la que las tecnologías de la información y la comunicación han invadido todos los ámbitos de la sociedad, y los niños desde sus primeros años de vida están familiarizados con las PC, los *tablet*, los teléfonos inteligentes y con los videojuegos cuyo propósito es generalmente recreativo. Conscientes de esta realidad, consideramos que el uso de recursos informáticos puede incentivar el interés por el aprendizaje de las ciencias desde las edades más tempranas. El alumno de estas edades debe aprender de una manera amena y divertida, o sea, a través de materiales que puedan utilizarse fuera del escenario escolar, lo que constituye la base esencial de la enseñanza lúdica.

Existen ya en el mundo varios recursos informáticos dirigidos a los niños que facilitan el aprendizaje de la astronomía. El que presentamos se contextualiza a la realidad cubana. Consta de una selección adecuada de medios ya existentes y una explicación base que realizan los autores, apropiada al lenguaje de los niños y a los contenidos que reciben en los currículos de las escuelas primarias cubanas.

Para el diseño y los contenidos de la multimedia se hizo un análisis de los programas de las asignaturas El Mundo en que Vivimos, del primer ciclo de la enseñanza primaria, y Ciencias Naturales, del segundo ciclo.

En el programa de El Mundo en que Vivimos para el tercer grado se declara entre sus objetivos continuar el desarrollo de nociones y representaciones e iniciar la formación de conceptos simples acerca de la naturaleza y habilidades vinculadas a ellos. Para esto los niños deben identificar la naturaleza como el conjunto del Sol, la Luna, las estrellas, nuestro planeta Tierra; al aire, el agua, el suelo, las plantas, los animales; el hombre y todo lo que él produce. Asimismo, deben reconocer su diversidad y ejemplificar sus relaciones y cambios (MINED, 2006a).

Entretanto, en el cuarto grado se orienta continuar la formación y el desarrollo de nociones y conceptos simples acerca de la naturaleza y habilidades vinculadas a ellos; para lo cual los alumnos deben definir el concepto «naturaleza» e identificar sus componentes. De igual modo, deben reconocer, mediante ejemplos, su diversidad, relaciones, cambios, transformaciones y movimientos (MINED, 2006b).

Por su parte, el programa de Ciencias Naturales del quinto grado pretende formar nociones y conceptos elementales científico-materialistas acerca de la naturaleza, mediante el estudio de objetos, fenómenos y procesos geográficos, físicos, astronómicos, químicos y biológicos que se dan en el planeta en estrecha concatenación (MINED, 2008a).

Igualmente, se persigue que los alumnos logren:

- Ampliar los conocimientos de la naturaleza al observar y describir el aspecto del cielo durante la noche.
- Identificar y comparar los astros que componen el sistema solar y describir los movimientos de traslación y de rotación.
- Identificar el calor y la luz como formas de propagación de la energía solar y describir fenómenos relacionados con ellos.
- Explicar la importancia del Sol para la vida del planeta.
- Observar experimentos sencillos que demuestren la atracción gravitatoria y describir la forma de la Tierra.

- Identificar la esfera geográfica y los mapas como representaciones cartográficas de la Tierra y leer de manera sencilla la información que ellos ofrecen.
- Definir paralelos y meridianos y localizarlos en la esfera y los mapas.
- Identificar los círculos principales de la esfera determinados por las diferentes zonas de iluminación del planeta.
- Explicar las consecuencias de los movimientos de la Tierra y la inclinación de su eje a partir de ejemplos concretos.
- Identificar a la Luna como único satélite natural de la Tierra, describir sus fases y reconocer los tipos de eclipses.

Por último, en el programa de Ciencias Naturales de sexto grado, entre los objetivos se plantea contribuir a la formación de la concepción científica del mundo en los alumnos, mediante un sistema de conocimientos y habilidades que les sirvan de base para reconocer las relaciones esenciales que existen entre objetos, fenómenos y procesos de la naturaleza, así como reconocer la materialidad, cognoscibilidad y movimiento como propiedades de los objetos, fenómenos y procesos biológicos, geográficos, astronómicos, físicos y químicos (MINED, 2008b).

Partimos de la necesidad de enriquecer aquellos aspectos que se abordan en los currículos con un material audiovisual que resulte atractivo a los niños, de forma que se logre la profundización de los contenidos recibidos por ellos, pero atendiendo al desarrollo cognitivo de sus edades y sin perder de vista las condiciones de informatización de la sociedad cubana, en la que no todos tienen acceso directo a Internet.

Si bien es cierto que ya existen en el mundo, «colgados» en diversos sitios de Internet, innumerables recursos elaborados con la finalidad análoga al que proponemos, señalamos que, como característica fundamental, un medio utilizado en clases debe estar contextualizado; consideramos entonces que los docentes deben crear sus propios medios o diseñarlos en caso de que su elaboración tenga un alto nivel de complejidad, y deben adaptarlos a sus condiciones y a las características de sus estudiantes. A partir del diseño de nuevos recursos informáticos como apoyo a la enseñanza, se desarrolla la creatividad del profesor, que se convierte en innovador del proceso de enseñanza-aprendizaje y propicia que se active el papel del estudiante (Bautista, 2001).

Asumimos las posiciones de Cabero (2018) sobre los medios: «No existe el “supermedio”. No hay medios mejores que otros, su utilidad depende de la interacción de una serie de variables y de los objetivos que se persigan» (p. 27), así como de las decisiones metodológicas que apliquemos sobre estos. Podemos preferir un medio a otro, un medio puede ser más fácil de utilizar que otro, o estar más disponible, pero ello no significa que sea mejor que su opuesto. Esta postura nos lleva inmediatamente a otro planteamiento, y es que la complementariedad e interacción de medios debe ser un principio y estrategia a utilizar por los profesores a la hora de la selección y puesta en práctica en el diseño instruccional de los medios.

Se realizó, además, una investigación acerca de lo que sucede al respecto en otros países. El reconocimiento de que existen serios problemas de comprensión y de transmisión de temas científicos no es de ayer. La literatura especializada en métodos de enseñanza-aprendizaje, las publicaciones sobre las más comunes nociones alternativas y cómo detectarlas, y los trabajos sobre las diversas maneras de acercarse paulatinamente a un cambio conceptual son abundantes. Diversas instituciones se han dedicado a tratar de mejorar la cultura científica en las escuelas, para todos sus integrantes, y programas de alfabetización científica están presentes desde hace ya varios años. Autores como María (2016) refieren ejemplos dignos de mención (sin ánimo de presentar una lista completa), tales como:

- En Estados Unidos, el programa Inquiry-Based Science Education, Hands-on Project, liderado desde antes de 1990 por el físico norteamericano Leon Lederman.
- En Francia, el programa La Main à la Pâte, impulsado por los físicos Charpak, Léna (astrónomo, en realidad) y Quéré, desde 1996.
- En Chile, el proyecto Educación en Ciencias Basado en la Indagación (ECBI), que funciona por lo menos desde 2003.

El recurso Webmedia de Astronomía para niños que se presenta está dedicado a alumnos y maestros de la enseñanza primaria entre el tercer y sexto grados. Para escoger los temas, se parte de analizar los temas curriculares ya referidos con anterioridad (figura 1), y se toma como punto de partida la tesis doctoral de Kessel (2015), cuyo aporte práctico fue una multimedia de astronomía, con temas de interés para niños.

1. Curiosidades astronómicas.
2. Fases de la Luna.
3. Eclipses.
4. Eclipses de Sol.
5. Eclipses de Luna.
6. Edad de la Luna.
7. El Sistema Solar.
8. Los Planetas.
9. ¿Por qué en verano hace más calor que en invierno?
10. ¿Cuál es la causa de las estaciones?
11. Las mareas.
12. Cómo calcular el día de la semana mentalmente.
13. Origen de los días de la semana.
14. Origen de calendario.
15. Origen de los nombres de los meses.
16. ¿Por qué sale el Sol?
17. Zonas horarias.
18. ¿Cómo es de grande el universo?
19. ¿Cuál es la velocidad a la que nos movemos en el espacio?

Figura 1. Temas que contiene la Webmedia de Astronomía para niños.

Este recurso informático se utilizó preliminarmente en el curso 2017-2018, en un círculo de interés científico. En dicha experiencia se constató el interés despertado por los temas abordados tanto en estudiantes como en los maestros de este nivel de enseñanza. Durante el uso de esta multimedia en el círculo de interés se pidió a los niños que expresaran qué otros temas resultarían de su interés para diseñar otros materiales audiovisuales similares.

Conclusiones

Se elaboró el recurso informático Webmedia de Astronomía para niños, con la finalidad de favorecer el interés por esta rama de la ciencia en niños de primaria y de facilitar a los maestros de las asignaturas El Mundo en que Vivimos y Ciencias Naturales un material de apoyo en su desempeño.

Se utilizó en círculos de interés científico en la enseñanza primaria y se obtuvo información sobre qué otros temas resultan de interés en estas edades.

Bibliografía

- BAUTISTA, J. M. (2001): «Criterios didácticos en el diseño de materiales y juegos en Educación Infantil y Primaria», *Agora Digital*, n.º 2, pp. 165-170, <<http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=963215>> [12/1/2017].

- CABERO, J. (2018): «Tecnologías en la era de la globalización», <<https://recyt.fecyt.es/index.php/comunicar/article/view/2554>> [2/2/2018].
- ESCRIBANO, E. (2016): «José Martí es el principal referente de la cultura cubana», *Red Iberoamericana de Comunicación y Divulgación de Información Científica*, <<http://oei.org.gt/historico/divulgacioncientifica/index1c4f.html?Elmys-Escribano-Hervis-Jose-Marti-es-el-principal-referente-de-la-cultura>> [2/2/2018].
- KESSEL, J. (2015): «Estrategia didáctica para el desarrollo de la cosmovisión en los estudiantes de la carreras de Ingenierías», tesis de doctorado, departamento de Física, Universidad de Matanzas, <<http://cict.umcc.cu/>> [12/1/2017].
- MARÍA, J. (2016): «Astronomía en la escuela: situación actual y perspectiva», <<https://www.researchgate.net/publication/242263826>> [12/1/2017].
- MINISTERIO DE EDUCACIÓN (MINED) (2006a): «Programa El Mundo en que Vivimos. Tercer Grado», <<http://www.mined.gob.cu/educaciones/primaria/programas>> [12/1/2017].
- MINISTERIO DE EDUCACIÓN (MINED) (2006b): «Programa El Mundo en que Vivimos. Cuarto Grado», <<http://www.mined.gob.cu/educaciones/primaria/programas>> [12/1/2017].
- MINISTERIO DE EDUCACIÓN (MINED) (2008a): «Programa Ciencias Naturales. Quinto Grado», <<http://www.mined.gob.cu/educaciones/primaria/programas>> [12/1/2017].
- MINISTERIO DE EDUCACIÓN (MINED) (2008b): «Programa Ciencias Naturales. Sexto Grado», <<http://www.mined.gob.cu/educaciones/primaria/programas>> [12/1/2017].



La astrofísica, sus potencialidades para la formación medioambiental del estudiante universitario

ERNESTO MILLARES RODRÍGUEZ,* JUAN GUSTAVO
KESSEL RODRÍGUEZ,** BEATRIZ CONSUEGRA LEZCANO,***
MARGARITA LIBERTAD MIRANDA DEL REAL*

Introducción

El desarrollo actual de la ciencia se caracteriza por un vínculo estrecho con la práctica y las aplicaciones tecnológicas. Considerada como una fuerza productiva, la ciencia desempeña un papel que será cada vez más importante en la medida en que evolucione la sociedad. Es por ello que los Estados deben atender sus necesidades fundamentales y las condiciones que posibiliten la aplicación de los beneficios de la revolución científico-técnica, como proceso que abarca a toda la sociedad y que ha modificado los procedimientos con los que se enfrentan los diferentes problemas.

En respuesta a las nuevas exigencias, el Ministerio de Educación Superior cubano presta especial atención al perfeccionamiento continuo del modelo del profesional a través de la mejora de sus planes de estudios. En relación con las aspiraciones en el plan de estudios se define:

promover en los estudiantes una correcta y moderna cosmovisión, para lo cual establece en la fundamentación de una concepción científica del mundo sustentada en los principios del materialismo dialéctico; también se establece el sistema de valores, en él se indican dos aspectos con marcado interés para la investigación: en el componente intelectual se

* Departamento de Desarrollo de Recursos para el Aprendizaje, Universidad de Matanzas, Cuba.

** Facultad de Educación, Universidad de Matanzas, Cuba.

*** Facultad de Ciencias Técnicas, Universidad de Matanzas, Cuba.

enfatisa en la responsabilidad y el saber, y en el técnico, en el trabajo por la eficiencia» (Ministerio de Educación Superior, 2009).

La astrofísica, al dedicarse al estudio de la naturaleza física de los cuerpos celestes, entre los que se incluye a la Tierra por ser un cuerpo del espacio sideral, se sustenta en el mismo sistema de principios y leyes cuya génesis se basa en las concepciones filosóficas del mundo en el devenir del hombre, sobre las que se elaboran los diferentes cuadros físicos y su cosmovisión. Los métodos astrofísicos, como sustentan una concepción científica, en la práctica docente conducen a una participación activa de los estudiantes, constituyen herramientas indispensables en vínculo directo con la naturaleza que estudian: observan, analizan directamente objetos y fenómenos del universo en su dinámica; realizan experimentos naturales, de laboratorio o prácticos; investigan en el terreno, solucionan y plantean suposiciones o hipótesis, orientándose en la búsqueda de lo esencial a través de seminarios o talleres y de las relaciones causa-efecto en las fuentes que analizan y consultan; elaboran conclusiones, valoran y enjuician lo que aprenden, entre otras acciones que intensifican la actividad cognoscitiva, práctica valorativa y creativa, desde los presupuestos de la Física General, bajo la conducción y guía del docente. Por tanto, contribuyen a la formación medioambiental de los estudiantes, a su vez, un elemento importante para el desarrollo de la cosmovisión declarada en los objetivos.

1. Formación medioambiental de los estudiantes

La concepción del estudio se sustenta en las estrategias curriculares (Ministerio de Educación Superior, 2009). Se establecen las indicaciones para las aplicaciones de la física y las tecnologías, así como las posiciones sobre el medioambiente, además, se enfatiza en la necesidad e importancia de lograr un aprendizaje desarrollador en la etapa de ejecución de las diferentes tareas durante el proceso de enseñanza-aprendizaje.

La investigación se estructuró en tres etapas y cada una consta de diferentes fases, en las cuales se precisa el objetivo y el sistema de trabajo. La etapa de diagnóstico se dedicó a la revisión documental para determinar la factibilidad del estudio y las particularidades de la estrategia; se diagnosticaron los niveles de conocimiento de los estudiantes al entrar a los estudios superiores, con apoyo en el criterio de los profesionales, y se determinó su estado al inicio de la aplicación del cuasi-experimento. En la segunda etapa se con-

feccionó la estrategia didáctica, en la cual se elaboran los medios y un folleto con temas de Astrofísica y Física para el trabajo de estudiantes y profesores.

La tercera etapa se dedicó a la aplicación y validación a través del cuasi-experimento. Consta de tres fases correspondientes a los semestres en los que se imparte Física General para el curso regular diurno. En ella se valoran los resultados de la comparación de un grupo experimental, en el que se integran sistemáticamente los contenidos de Astrofísica al proceso de enseñanza-aprendizaje, y un grupo de control que sigue el modo tradicional.

1.1. Conocimientos sobre el medioambiente a nivel local y planetario

Se consideró la adquisición por los estudiantes de las nociones sobre el medioambiente a partir de la integración de contenidos astrofísicos en el proceso de enseñanza-aprendizaje de Física General (Mecánica, Electromagnetismo y Física Moderna) referentes a: balance térmico, efecto de invernadero, radiación térmica, interacción Sol-Tierra, el viento solar y otros en los que se destaquen las implicaciones para la vida del hombre y el planeta Tierra.

El nivel alcanzado por los estudiantes en la formación medioambiental se valora a través de un estudio en el que se comparan los resultados que se logran en dos grupos, uno experimento y otro de control. Se sigue el criterio expuesto anteriormente de integración de los contenidos en el tratamiento de la Física General en el grupo experimental y el tratamiento tradicional en el de control. Estos se evalúan a través de los siguientes indicadores y, además, se compara la influencia en la motivación profesional:

- Nivel de aplicación a la enseñanza-aprendizaje de los estudios sobre el medioambiente.
- Nivel de los conocimientos físicos y astrofísicos relacionados con el medioambiente.
- Nivel de integración de los contenidos físicos, astrofísicos y el medioambiente.

Los indicadores concretan las acciones valorativas de los estudiantes, de modo tal que permitan mostrar la presencia de conocimientos dirigidos al análisis reflexivo, de las condiciones de las tareas y la búsqueda de estrategias para su solución, como forma de acercarlos al conocimiento

de sí, y con ello, lograr la regulación de sus conductas en relación con el medioambiente y la sostenibilidad del planeta Tierra, puestas en evidencia en los talleres, seminarios y encuestas.

1.2. La formación medioambiental y la motivación profesional

El componente motivacional considera el nivel de información y las nociones de los estudiantes con respecto al desarrollo del proceso de enseñanza-aprendizaje en función de la motivación por la profesión, las autovaloraciones, sus expectativas, la medida en que se logra favorecer el alcance de relaciones significativas entre los contenidos que aprenden y la vida, así como el de los métodos y medios elaborados al perfil profesional del ingeniero cubano.

Se utilizan cinco evaluadores para su estudio, que siguen el criterio expuesto anteriormente. Se valoran a través de los siguientes indicadores:

- Nivel de significación e importancia de los estudios integrados de Física y Astrofísica.
- Nivel de satisfacción por la calidad del proceso de enseñanza-aprendizaje a través de la integración de contenidos físico-astrofísicos.
- Actitud de los estudiantes para enfrentar los estudios.

La motivación es muy importante para el desempeño de los estudiantes durante el proceso de investigación. Existen múltiples ejemplos en la evolución histórica de las investigaciones en el campo de la Astronomía y la Astrofísica que confirman su interrelación con la vida material y espiritual de los hombres, su valor práctico innegable, su fortaleza para la formación de la concepción científica del mundo, fuente de desarrollo de variadas áreas del conocimiento y centro de los debates filosóficos actuales sobre la creación y el lugar de las civilizaciones. Los círculos científicos que se han identificado con la Astrofísica convergen en que este conocimiento es importante para la formación de profesionales en diferentes áreas de las ciencias naturales y sociales, debido a su influencia en la esfera motivacional de los estudiantes, dimensión que controla y evalúa la investigación (Flower, 2009; Alpizar, 2014; Faure, 2014).

2. Diagnóstico para el estudio

Los resultados del diagnóstico demostraron que una proporción significativa de estudiantes no se había apropiado de los conocimientos

esenciales de la Astrofísica que se relacionan con las teorías y leyes generales de la Física General. Estos conocimientos fomentan en los estudiantes la formación medioambiental y la cosmovisión de los fenómenos naturales, en correspondencia con las exigencias del modelo del profesional que se propone lograr el plan de estudios D, y no se desarrollan en los niveles deseados en las condiciones actuales del proceso de enseñanza-aprendizaje.

La evaluación de las dimensiones en el estudio del estado actual es la siguiente:

- Conocimientos sobre aplicaciones físicas y tecnológicas en la investigación espacial: 53 %;
- Conocimientos sobre el medioambiente: 50 %;
- Motivación por los estudios sobre el cosmos: 63 %.

Se aprecia el alto impacto que tienen los estudios relativos al cosmos en la motivación de los estudiantes, de modo que es un elemento importante en la construcción de los móviles profesionales la integración de estos conocimientos en sus estudios actuales. Las dimensiones referentes al conocimiento sobre el medioambiente y las aplicaciones de la física y las tecnologías no tienen igual preponderancia; el 50 % de los estudiantes no adquieren de los estudios actuales las bases científicas y conocimientos esenciales para interpretar el medioambiente, las aplicaciones físicas y tecnológicas desde las potencialidades de la Física General.

Grado de aplicación de las leyes y teorías físicas en la investigación espacial: 53 %

En este aspecto se tomaron ocho criterios de medida de las encuestas de conocimientos. Una parte significativa de los estudiantes no se identifica correctamente con las aplicaciones de la Física y las investigaciones espaciales y sus bases tecnológicas, 19 de 40 expresaron el nivel más bajo de conocimiento. Estos resultados son una expresión de la contribución que han tenido los estudios anteriores de Física y de todas las ciencias y asignaturas relacionadas con el tema a este conocimiento.

Conocimientos relativos al medioambiente: 50 %

En este aspecto la mitad de los estudiantes no se identifica correctamente con los fenómenos del medioambiente y los fundamentos físicos. Evidencian un nivel limitado, no existe correspondencia entre

los niveles en que expresan la motivación por el conocimiento y el propio conocimiento. Se aprecia como una insuficiencia en los estudiantes, es algo que les falta y desean.

Motivación por los estudios sobre el cosmos: 63 %

Este resultado logrado es muy importante, expresa que a los estudiantes les interesan los estudios sobre los cuerpos celestes y el universo. 25 de 40 se manifestaron positivamente, de modo que es un atractivo en el proceso de enseñanza aprendizaje el desarrollo de estos contenidos en los perfiles de las ciencias y las asignaturas de las carreras que estudian. Estos resultados demuestran las insuficiencias en la formación medioambiental y en la cosmovisión en los estudiantes como resultado del proceso de enseñanza-aprendizaje de la Física General tradicional. Los resultados del diagnóstico se exponen en la tabla 1.

Tabla 1. Comparación de los niveles de conocimiento físico (F) y astrofísico (A)

NIVELES	ESTUDIOS NO PARAMÉTRICOS			RESULTADOS
	F	A	TOTAL	
3	0,08/3	0,15/6	9	$\chi^2 = 6,378$
2	0,18/7	0,38/15	22	df = 2
1	0,75/30	0,48/19	49	P = 0,0412
T	40	40	80	

3. Métodos y procedimientos

Se realizan las siguientes acciones:

- Acción 1. La concertación para las necesidades a satisfacer a través de acciones de la estrategia se realiza en un espacio de trabajo metodológico del grupo de profesores convenido y la aplicación de la constatación pedagógica dirigida a los estudiantes es guiada por el responsable de la tarea; se utiliza como forma de trabajo metodológico el taller.
- Acción 2. El programa de las acciones se diseña de acuerdo con las necesidades de los estudiantes y profesores, con atención a todos los componentes del contenido y el tipo de aprendizaje.
- Acción 3. La presentación de la estrategia al departamento u organismo competente tiene como objetivo obtener el consentimiento para su aplicación. Participan las comisiones científicas en los diferentes niveles de actuación. Se utiliza como método esencial

el diálogo. Se propicia el intercambio en torno a la necesidad real de aplicar la estrategia y se negocia acerca de sus términos.

- Acción 4. La selección de los profesores para implementar la estrategia se realiza teniendo en cuenta, entre los recursos humanos disponibles, aquellos que se considere tienen los conocimientos y experiencia para asumir la tarea. Se recomienda la valoración de la dirección del departamento. En cada parte de la Física trabajaron tres profesores durante la constatación.
- Acción 5. La preparación de los profesores se realiza mediante un taller metodológico. Su objetivo es explicar la concepción didáctica apoyándose en los conocimientos y experiencias de los participantes, de modo que se sientan parte activa de la estrategia. Se utilizan como métodos la reflexión, el debate y el diálogo. Se recomienda distribuir un material impreso con el programa de conferencias, talleres, seminarios y el programa de autopreparación concebido en la estrategia.

La selección de los talleres como forma de trabajo metodológico, y a la vez vía de superación, tiene como propósito crear condiciones que favorezcan el clima de libertad entre los participantes y la comunicación afectiva, el diálogo y la confrontación de experiencias, promoviendo el juego libre de ideas en un marco de respeto, la crítica y el aporte de soluciones creativas. Se pretende aprender a aprender como condición para el cambio interno, así como establecer el principio de horizontalidad o relaciones entre iguales que tomen en cuenta las motivaciones, capacidades y potencialidades personales.

El responsable de las acciones es el coordinador de la actividad. Las acciones correspondientes a la etapa organizativa deben ejecutarse antes del inicio del curso escolar, en el período comprendido entre mayo y agosto.

La estrategia se ejecutó de la siguiente manera:

- Objetivos: desarrollar las diferentes acciones de la estrategia para la aplicación pedagógica y evaluar el desarrollo de la formación medioambiental como vía para desarrollar la cosmovisión en los estudiantes por etapas de la Física General.
- Acciones de los profesores: para dar cumplimiento a este objetivo, en cada una de las asignaturas los profesores precisan los nodos interdisciplinarios entre los contenidos de Física y

Astrofísica. Establecen la interrelación principios–contenidos físicos y astrofísicos–acciones durante el desarrollo de los contenidos en las diferentes asignaturas. Evalúan el desempeño de los estudiantes en cada una de las actividades.

En Física I se desarrolla el contenido con predominio de las conferencias y clases prácticas, se incluyen cinco laboratorios y un seminario acorde a la independencia de los estudiantes.

De igual modo, en Física II se desarrolla el contenido con predominio de las conferencias y clases prácticas, se incluyen cinco laboratorios, pero se incrementan los seminarios. En esta etapa el nivel de independencia de los estudiantes es mayor, se les da más protagonismo, aunque se requiere que la participación de los profesores sea frecuente para el desarrollo de las acciones de aprendizaje.

Por último, en Física III se desarrolla el contenido con predominio de los seminarios, talleres y laboratorios; las conferencias y clases prácticas se centran en el contenido teórico indispensable; se incluyen en los talleres contenidos que se desarrollan a través de la exposición del profesor o los estudiantes seleccionados al efecto. En esta etapa el nivel de independencia de los estudiantes es mayor, se les da más protagonismo, la participación de los profesores se orienta a la coordinación y guía de las acciones en el desarrollo de las tareas de aprendizaje.

Los resultados obtenidos se exponen en las figuras 1 y 2.

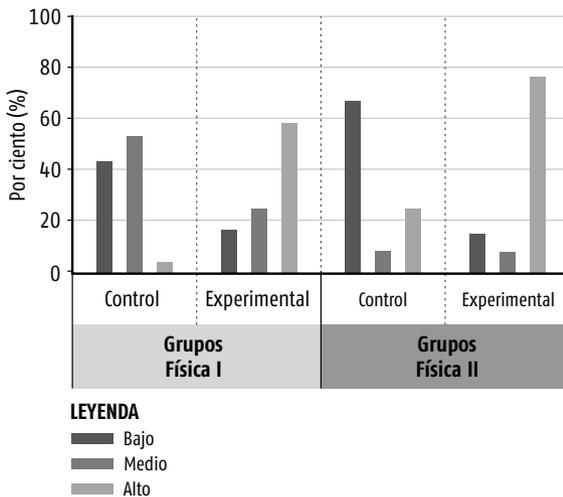


Figura 1. Resultados de los conocimientos sobre el medioambiente.

El comportamiento de los niveles en que aparecen los estudiantes de los grupos demuestra que las tendencias son contrarias. En el grupo control decrece la proporción de estudiantes hacia el nivel alto, con poca diferencia entre los niveles bajo y medio; esta es creciente en el grupo experimental, se agudiza la diferencia en los niveles bajo y alto, y es más notable la del nivel alto. Esto confirma que los estudiantes del grupo de control no adquieren los conocimientos integrados físicos-astrofísicos sobre el medioambiente que se corresponden con los indicadores de esta dimensión desde la Física General. Esos conocimientos tienen una significación especial en su contribución al desarrollo de la cosmovisión en los estudiantes, por la sensibilidad en el modo de actuación respecto al medioambiente en las condiciones actuales que vive el planeta Tierra.

La contribución de la disciplina a la motivación profesional expresa un nivel superior en el grupo experimental respecto al grupo de control en la etapa de la Física I. Ambos grupos manifiestan igual comportamiento en la distribución de los niveles y la diferencia más notable se aprecia en Física II (figura 2).

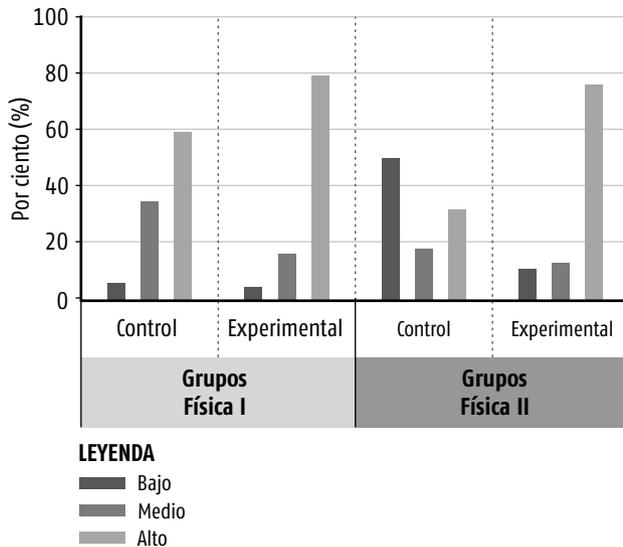


Figura 2. Resultados sobre la contribución de la disciplina Física General a la motivación profesional.

Esta dimensión manifiesta una tendencia creciente hacia los niveles medio y alto en los dos grupos durante la primera fase. La diferencia

en el nivel bajo es la menor y a la vez de menor puntaje entre los grupos que se comparan; en el grupo de control se encuentra la mayor cantidad de estudiantes en este nivel. El indicador más representativo en este resultado correspondió a la significación e importancia de los estudios integrados de Física y Astrofísica. En el nivel medio hay mayor proporción de estudiantes del grupo de control con respecto al grupo experimental; se acentúa la diferencia en relación con el nivel bajo, con predominio de los estudiantes del grupo de control en este nivel. Se manifiesta de manera positiva la actitud para enfrentar los estudios bajo la influencia de los contenidos astrofísicos.

En el nivel alto predominan los estudiantes del grupo experimental, la diferencia es notable con respecto del grupo de control, y la manifestación fundamental se debe a los niveles en que se expresa la satisfacción por la calidad del proceso de enseñanza-aprendizaje a través del desarrollo de contenidos físico-astrofísicos. El 40,8 % de los estudiantes del grupo de control muestra insatisfacciones, al igual que el 20,8 % de los del experimental. En los primeros se agudiza la falta de conocimientos al no identificar cómo se interrelacionan los contenidos de la Física que reciben con los aspectos básicos sobre el medioambiente, así como la manifestación integral de estos contenidos en su universidad. En los segundos predomina la necesidad de ampliar los contenidos sobre las ciencias espaciales en su sistema de conocimientos, a través de sus estudios correspondientes a la Física de las carreras de Ciencias Técnicas.

Conclusiones

El diagnóstico para la investigación abarcó el estudio documental, en el que se consignaron aspectos relevantes que justifican el trabajo investigativo, obtenidos del análisis del modelo del profesional del ingeniero cubano y el plan de estudios, cuyas aspiraciones se materializan en los programas de las disciplinas y asignaturas.

Por otra parte, el estudio del estado actual confirmó los bajos niveles en los conocimientos de los estudiantes como resultado de los cursos precedentes, con énfasis en la integración de contenidos astrofísicos en el proceso de enseñanza-aprendizaje de la Física General.

Se demostró a través de la comparación de los grupos de control y experimento la contribución positiva de los contenidos astrofísicos en los cursos de Física General para fomentar la formación medioam-

biental, así como al desarrollo de la cosmovisión en los estudiantes con el respaldo de las dimensiones controladas.

De igual modo, se determinó que en los grupos donde el contenido de la Física General se fundamenta en el desarrollo de los contenidos de Astrofísica se logra que una proporción mayor de estudiantes exprese niveles superiores en la formación medioambiental y la contribución de la disciplina a la motivación profesional, bases para el desarrollo de la cosmovisión en los estudiantes desde la Física General.

La novedad científica del estudio radica en que la investigación aporta elementos que demuestran la importancia de la Astrofísica para la actividad cognitiva, la práctica y la motivación profesional de los estudiantes en función del contexto actual internacional y cubano, al integrar conocimientos sobre la problemática ambiental, las fuentes de energía, las fuentes alternativas y la ley del medioambiente desde la disciplina Física General como base de la cosmovisión (Cabrera, 2004).

Bibliografía

- ALPIZAR, D. O. (2014): «Calculs dynamique inelastique pour collisions moléculaires d'interet Astrochimique», tesis de doctorado, L' Université de Bordeaux.
- CABRERA, J. A. (2004): *La educación ambiental para el desarrollo sostenible*, La Habana: Ministerio de Educación.
- COCHRAN, W. G. (2005): *Técnicas de muestreo*, México D. F.: Continental S. A.
- CRUZ, M. R. *et al.* (2003): *Estadística aplicada en la investigativa educativa*, La Habana: Educación Cubana.
- FAURE, M. (2014): «Hydrogen/deuterium Exchange in Interstellar Ice Analogs», <<https://astrorennes2014.sciencesconf.org/file/99110>> [23-12-2018].
- FLOWER, D. (2009): *Molecular Collisions in the Interstellar Medium*, Cambridge University Press, <<https://www.cambridge.org/core/books/molecular-collisions-in-the-interstellar-medium/4F5E53499B7A-DA47C7FDD81E8BF37DDA>> [23-12-2018].
- MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR (MES) (2009): «Plan de estudios D», La Habana.



El medioambiente en un Curso de Introducción a la Cosmología

RAÚL PORTUONDO DUANY*

La evolución de la Tierra (formación y movimiento de placas tectónicas, cambios en la radiación solar, períodos volcánicos intensos, impactos de aerolitos, etc.) ha conllevado cambios climáticos fuertes a lo largo de su historia, con extinciones masivas notables (figura 1).

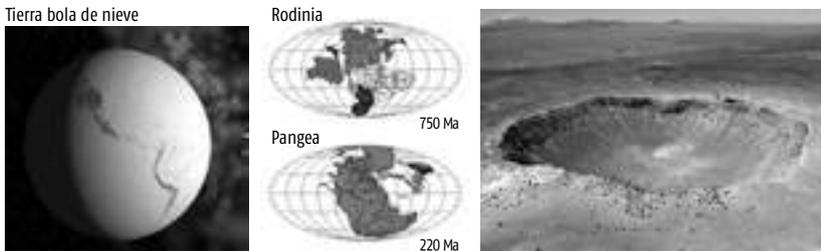


Figura 1. Evolución de la Tierra.

Durante los últimos dos millones de años se vienen produciendo en la Tierra períodos de calentamiento y de glaciaciones de unos cien mil años de periodicidad, con unos diez mil años cálidos interglaciales (en el último calentamiento interglacial surgió la agricultura y la civilización). En las glaciaciones, las capas polares descienden hasta los trópicos por unos noventa mil años (figura 2).

* Departamento de Física, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez.

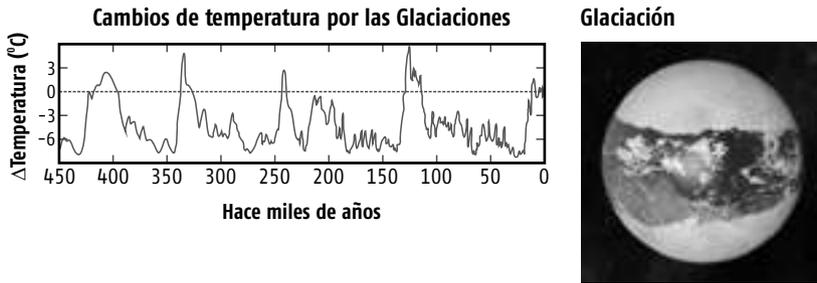


Figura 2. Cambios de temperatura por las glaciaciones.

Estamos cerca de la próxima glaciación, que es antecedida por un calentamiento global. Se derriten los hielos polares y baja la salinidad del agua cerca de los polos, al punto que la corriente del Golfo, al enfriarse cerca del círculo polar ártico, no puede hundirse en el agua salada más profunda del océano para retornar a las zonas cálidas por aguas profundas: se rompe así la circulación planetaria de agua fría y caliente, no llega más agua caliente a los países nórdicos y empiezan a enfriarse los continentes del hemisferio norte, con sus costas ya inundadas por los derretimientos previos de los hielos (figura 3).



Figura 3. Fenómenos resultantes de los cambios de temperatura en la Tierra.

Cambian los regímenes de vientos y lluvias, cambian las zonas selváticas y desérticas, aumentan la frecuencia y la potencia de los huracanes, fallan las cosechas, surgen hambrunas y enfermedades, y se produce otra extinción masiva (ya en marcha) (figura 4).

Hay que retrasar el calentamiento global para lograr nuevas técnicas de producción de potencia y sustituir el petróleo, el gas natural y la hulla: disminuir gases de efecto invernadero para retardar el calentamiento que dispara la glaciación, no envenenar y estropear

las fuentes de aguas necesarias para el normal funcionamiento de la cadena alimenticia que comienza en los océanos, proteger las fuentes acuíferas (figura 5). (Para el año 2100 la temperatura media puede haber subido hasta 4°C y el nivel promedio de los mares pudiera subir más de 0,5 m).

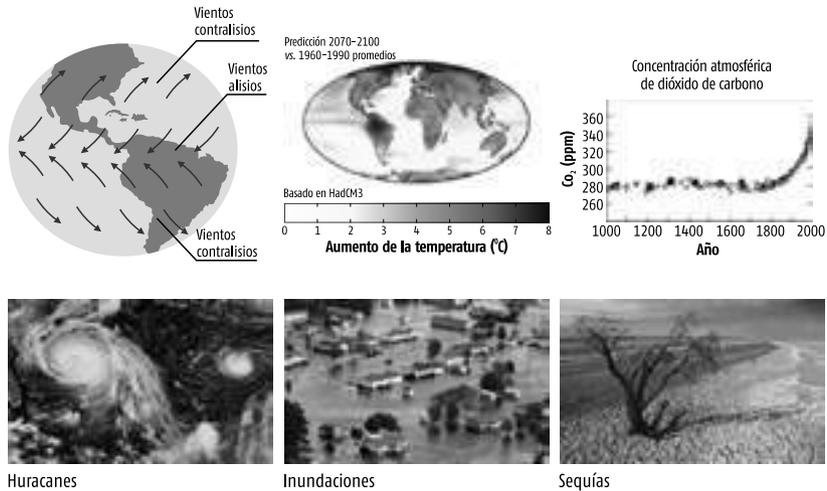


Figura 4. Predicción del calentamiento global.



Figura 5. Polución y sequía.

Se hace necesario desarrollar rápido nuevas tecnologías (incluida la fusión controlada) antes de que lleguen los cambios climáticos que, de una u otra manera, llegarán (figura 6).

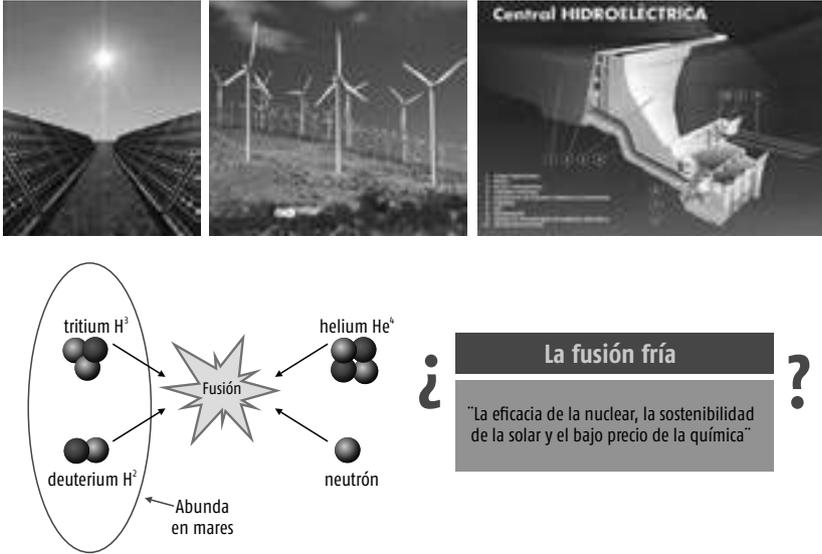


Figura 6. Nuevas tecnologías para retrasar el cambio climático.

Bibliografía

- LOVELOCK, J. (2007): *La venganza de la Tierra*, Barcelona: Editorial Planeta.
 LUNINE, J. I. (2013): *Earth: Evolution of a Habitable World*, Cambridge: Cambridge University Press.



II. Experiencias en el proceso de enseñanza-aprendizaje



Ciencia y solidaridad en el más alto grado: Maria Sklodowska-Curie

CARMEN CARRERAS,* MANUEL YUSTE*

1. Introducción: infancia y juventud

Maria Sklodowska nació en Varsovia el 7 de noviembre de 1867, época en la que Polonia estaba dividida y ocupada por Rusia, Austria y Prusia. Varsovia se encontraba bajo la dominación zarista, que prohibía cualquier manifestación cultural o religiosa del pueblo polaco. Cuatro años antes de que naciera Maria hubo un levantamiento contra el zar que fue duramente reprimido, por lo que los polacos decidieron cambiar de estrategia y adoptaron la *lucha intelectual*, movimiento clandestino que intentaba mantener vivas la cultura y las tradiciones polacas.

Maria nació en el seno de una familia culta. Era la quinta hija del matrimonio formado por Wladislaw Sklodowski, profesor de Física y Química en un liceo, y Bronislawa Boguska, directora de la más prestigiosa escuela de niñas de Varsovia (figura 1). Tras su nacimiento, su padre fue nombrado subdirector de un liceo y se trasladaron a vivir al nuevo domicilio que le otorgaba su cargo. Su madre renunció a su profesión y se dedicó al cuidado de sus cinco hijos (figura 2).

Durante sus primeros años, Maria gozó de una unión familiar que constituyó la firme roca a la que se aferró a lo largo de su vida. En casa, su padre tenía guardados aparatos de Física como auténticos tesoros en una vitrina del salón y enseguida se despertó en ella sus ansias de saber.

* Departamento de Física Interdisciplinar, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), Madrid, España.



Figura 1. Bronisława Boguska y Władysław Skłodowski, padres de Maria.

Los hermanos de su padre tenían casas solariegas en regiones polacas bajo dominación austriaca, menos opresiva que la zarista. En ellas pasaban sus vacaciones y allí surgió su pasión por la naturaleza, pasión que mantuvo hasta el final de sus días.

Al regreso de unas vacaciones, cuando Maria tenía 6 años, su padre sufrió en su propia carne la opresión rusa y fue despedido de su trabajo en el liceo y expulsado de su domicilio. Se vio obligado a

alquilar una nueva casa y para sobrevivir daba clases particulares; estableció en ella una pensión para estudiantes, lo que acabó con la intimidad familiar.



Figura 2. Los cinco hermanos (de izquierda a derecha): Zosia, Helena, Maria, Józef y Bronia.

Su madre padecía tuberculosis, por lo que se mantenía voluntariamente sin contacto físico con sus hijos para no contagiarlos. Maria siempre añoró las caricias de su madre. Además, uno de los pensionistas contagió el tifus que padecía a dos de sus hermanas. La mayor, Zosia, no superó la enfermedad y falleció cuando Maria tenía 9 años. La madre era muy religiosa y Maria imploraba a Dios para que se curara; pero dos años más tarde también murió. Este hecho marcó un antes y un después en su vida, sintió que ese Dios, al que ella había implorado para que salvara a su madre, se había olvidado de su familia y ella empezó a olvidarse de él, a alejar de sí la fe que había consolado a su madre pero que a ella no le reportaba nada. Esta posición la mantuvo durante toda su existencia.

Para animar a su padre, los cuatro hermanos se dedicaron a estudiar mucho y todos acabaron la enseñanza secundaria con medallas de oro. El chico, Józef, se matriculó en la Universidad de Varsovia para estudiar Medicina, pero Bronia no pudo hacerlo por el veto ruso a la entrada de las mujeres en la universidad, que las

condenaba a ser amas de casa, maestras o institutrices. Decidieron prescindir de los servicios de la señora que tenían contratada en casa y Bronia tomó las riendas del hogar, para ahorrar y poder irse al extranjero a estudiar Medicina.

Maria acabó con 15 años la secundaria, también con medalla de oro, e igual que su hermana se encontró sin ninguna meta ante sí. Entró en un estado depresivo debido a tantos esfuerzos y tanto dolor contenido. Ella misma lo definió como «fatiga del crecimiento y del estudio» (citado por Yuste y Rivas-Caballero, 2016). Su padre, como buen pedagogo, captó la situación y la envió a pasar un año en el campo con su familia; año maravilloso que Maria recordó toda su vida.

Cuando regresó a Varsovia, su padre se había trasladado a una vivienda más acogedora, en la que ya no había pensionistas, con lo que la intimidad familiar volvió a reinar en la casa. Pero un nuevo problema angustiaba a su padre: la reducción de su salario por su jubilación no permitiría costear los estudios de sus hijas Bronia y Maria, que soñaban con ir a París a estudiar en la Universidad de la Sorbona. Ambas decidieron dar clases particulares de aritmética, geometría y francés para poder ahorrar y hacer realidad sus sueños universitarios. Maria quería estudiar Física y Matemáticas.

1.1. La Universidad Volante

Mientras tanto, y para hacer más llevadera la espera, Bronia y Maria participaron en la llamada Universidad Flotante o Volante, movimiento clandestino para mantener vivas las raíces polacas. Profesores de universidad daban clases a grupos reducidos en casas particulares y los alumnos se convertían en profesores de otros estudiantes, creando una cadena de aprendizaje y colaboración. Todos eran conscientes de que en cada reunión corrían el riesgo de ser descubiertos y de ir a la cárcel. En esto consistió la lucha intelectual.

En sus relatos autobiográficos Maria resaltó el alto valor del compromiso que les movía:

Tengo un recuerdo muy vivo de aquella simpática atmósfera de camaradería intelectual y social. Los medios de acción eran pobres; los resultados no podían ser considerables, pero, no obstante, sigo creyendo que las ideas que nos guiaban entonces eran las únicas que podían conducirnos a un verdadero progreso social. No podemos confiar en construir un mundo mejor sin mejorar los individuos. Con este propósito, cada uno

de nosotros debe trabajar su propio perfeccionamiento, aceptando, en la vida general de la humanidad, su parte de responsabilidad, ya que nuestro deber particular es el de ayudar a aquellos a quienes podemos ser útiles. (citado por Yuste y Rivas-Caballero, 2016).

Esta es una primera muestra de su carácter solidario y responsable.

Como los recursos económicos no eran suficientes, Maria propuso a su hermana Bronia un plan: ella trabajaría como institutriz, tendría un sueldo mayor y todos sus gastos cubiertos. Bronia podría irse a París a estudiar Medicina y cuando acabase, trabajando ya como médico, podría financiar los estudios de Física de Maria en La Sorbona. Así lo hicieron y ambas comenzaron su nueva vida, Bronia en París y Maria en Szczuki, a 7 horas de viaje de Varsovia, alejada de los suyos, empleada como institutriz.

Aunque emprendió el viaje pensando que estaría cerca de la naturaleza, cuando llegó se encontró con hectáreas de remolacha y una fábrica azucarera donde los campesinos no sabían ni leer ni escribir, y lo poco que aprendían los niños era en ruso. La familia Zorawski, en cuya casa fue a trabajar, era la mayor accionista de la fábrica y el padre controlaba la explotación. Enseguida dedicó su tiempo libre a dar clases a los campesinos y a sus hijos en la clandestinidad de su habitación, con la complicidad de la hija mayor, de su misma edad, con la que había entablado una buena relación.

Los hermanos mayores estudiaban en la Universidad de Varsovia y regresaron a casa por vacaciones. Surgió un romance entre el mayor de los tres, Kasimierz, y Maria. Cuando él solicitó el beneplácito de su padre, este le dijo que una cosa era tratar bien a una institutriz y otra casarse con ella, por muy buena persona que fuese; que él estaba destinado a un matrimonio mucho más ventajoso económicamente y si se casaba con ella, lo desheredaría. Maria sintió dolor y humillación y si se mantuvo en la casa, como si nada hubiera pasado, fue porque los estudios de Bronia dependían de ella.

Al finalizar los tres años, regresó a Varsovia con su familia. Su padre había aceptado un ingrato trabajo bien remunerado, director de un correccional de niños, que permitía que Bronia terminara sus estudios y que ella pudiera trabajar en Varsovia y ahorrar para ir a estudiar a París. Pero Maria, después de las duras experiencias vividas y la añoranza de los suyos, pensó que ya no era tiempo de ir a París, que debía quedarse para atender a su padre y a sus dos hermanos.

Disfrutó de la intimidad familiar, contactó de nuevo con la Universidad Volante, y gracias a un primo que dirigía el Museo de la Industria y de la Agricultura, en el cual, sin levantar sospechas de las autoridades rusas, enseñaban ciencia a los jóvenes polacos, Maria experimentó el profundo placer de ensayar las reacciones químicas descritas en los libros de Física y Química que tanto había estudiado. Fue allí donde desarrolló su gusto por la investigación experimental.

El rencuentro con Kasimierz durante las vacaciones le permitió comprobar su inseguridad y rompió definitivamente con él. Ante la permanente insistencia de su hermana Bronia, después de un año de indecisiones, Maria aceptó su invitación a París. Bronia se había casado con un médico polaco exiliado y pasaban consulta en su propia casa.

2. El sueño de París

Siguiendo los consejos de su hermana, facturó todo lo que podía necesitar (su colchón, sábanas, toallas...), viajó en vagones de cuarta clase, de mercancías, sin asientos, llevando consigo comida, bebida, una manta, un paquete de caramelos, un libro y una silla plegable.

En su despedida prometió a su padre que su ausencia sería solo de dos o a lo sumo de tres años, hasta conseguir su licenciatura en Ciencias Físicas, y que luego regresaría para acompañarle en su vejez y ejercer como profesora en su país. Con el corazón dividido entre la ilusión y el remordimiento, finalmente en noviembre de 1891 cruzó el umbral de La Sorbona, convirtiéndose en una de las 23 mujeres entre los 2 000 estudiantes de la Facultad de Ciencias.

Para estar más cerca de la universidad y concentrarse en sus estudios se trasladó al Barrio Latino, donde vivió en diferentes buhardillas en condiciones muy precarias. En 1893 se licenció en Ciencias Físicas con el número uno de su promoción. Regresó orgullosa a su Varsovia querida con los suyos, con la idea de volver a París un año más para estudiar Matemáticas. Disfrutó de su familia durante las vacaciones y a la hora de regresar el dinero no alcanzaba para costear el viaje. Resignada a renunciar a su segunda licenciatura, recibió una magnífica sorpresa: por gestiones de una compatriota le concedieron una Beca Alexandrowitch de 600 rublos, lo que le permitió regresar a París. En 1894 se licenció en Ciencias Matemáticas con el número dos de su promoción.

Uno de sus profesores, Lippmann, le ofreció su primer trabajo científico remunerado: estudiar las propiedades magnéticas de diversos aceros. En cuanto cobró el trabajo, separó los 600 rublos para devolver-

los a la Bolsa de Becas Alexandrowitch para que pudieran ser utilizados por otro estudiante, ante el asombro del comité que le otorgó la beca.

En el transcurso del trabajo necesitó de espacio para realizar sus experimentos. Otro profesor polaco, que daba clases en la Universidad de Friburgo, llegó a París y Maria le contó su problema. Él le indicó que conocía a otro investigador francés que trabajaba en la Escuela Superior de Física y Química Industriales que quizá podría ayudarle. Así fue como conoció a Pierre Curie, quien desde el primer momento quedó prendado de la personalidad de Maria. Pierre era ya un científico notable en el campo del magnetismo. Había descubierto, junto con su hermano Jacques, la piezoelectricidad y diseñaron un aparato, el electrómetro piezoeléctrico de cuarzo, para medir corrientes eléctricas muy débiles, que fue de gran utilidad en los trabajos posteriores de Maria (figura 3).



Figura 3. Electrómetro piezoeléctrico de cuarzo diseñado por Pierre Curie y su hermano Jacques.

Aunque Pierre no podía resolver sus problemas de espacio, le ofreció su gran experiencia y su mucho saber. Empezó así una amistad que acabó en una colaboración científica del más alto nivel.

Pierre encontró en Maria la única mujer con la que poder compartir su vida, con la misma afición por la ciencia y la naturaleza y con los mismos valores sociales. No quería perderla. Pero Maria, aunque se sentía muy a gusto con Pierre, estaba convencida de que debía regresar a su casa y dar a su país todo lo que había aprendido, y así lo hizo. Pierre siguió insistiendo, incluso llegó a proponerle compartir la vida como simples compañeros de trabajo en un apartamento dividido en dos zonas independientes, lo que Maria rechazó categóricamente.

En una carta Pierre le decía: «Nos hemos prometido mantener, cuando menos, una gran amistad... Son cosas que no se pueden imponer. Y, no obstante, sería algo hermoso, en lo que no me atrevo a creer, el hecho de pasar la vida cerca el uno del otro, hipnotizados en nuestros sueños: su sueño patriótico, nuestro sueño humanitario y nuestro sueño científico» (citado por Yuste y Rivas-Caballero, 2016).

Le propuso, en un último intento por no perderla, trasladarse él a Varsovia para trabajar juntos. A Maria le conmovió mucho la propuesta. Por un lado, valoraba lo que suponía para un científico de su talla cambiar Francia por Polonia, y por otro, después de las humillaciones sufridas, tenía el honor de que un científico cuyos trabajos eran ya reconocidos en la comunidad internacional estuviese dispuesto a dejar todo por ella. Abrumada por tal proposición, finalmente accedió a volver a París y convertirse en madame Curie.

2.1. De Maria Sklodowska a Marie Curie

El 25 de julio de 1895 Pierre y Marie se casaron (figura 4). Ella sacó una plaza de profesora de enseñanza secundaria y él daba clases en la Escuela Superior de Física y Química Industriales de la Villa de París. El resto del tiempo lo dedicaban a la investigación.

En julio de 1897 muere la madre de Pierre y nace su primera hija, Irène. El padre de Pierre se traslada a vivir con ellos y se dedica a cuidar de la niña, lo que les proporcionó una inestimable ayuda para realizar sus trabajos científicos. En estas condiciones Marie se planteó buscar un tema para su tesis doctoral.



Figura 4. El matrimonio Pierre y Marie Curie.

2.2. La tesis doctoral

Dos años antes Roentgen había descubierto los rayos X, que tuvieron una inmediata aplicación en medicina. Muchos científicos se dedicaron a estudiarlos. Entre ellos, Becquerel descubrió que las sales de uranio emitían espontáneamente una radiación que, como los rayos X, ionizaba el aire e impresionaba las placas fotográficas. Marie dedicó su trabajo de tesis al estudio de la naturaleza de esta radiación.

Comenzó midiendo la capacidad de la nueva radiación para ionizar el aire. Para ello utilizó el electrómetro ideado por Pierre y su hermano. Para resolver las dificultades de estas medidas, que habían hecho que Becquerel abandonase el estudio de la radiación que él mismo había

descubierto, Pierre se unió al trabajo, y perfeccionó el aparato, a fin de conseguir medidas más sensibles para corrientes de baja intensidad. Marie se hizo experta en la utilización del electrómetro, como comentó uno de sus colegas:

Se sentaba ante el aparato realizando mediciones en la semioscuridad de un cuarto sin calefacción para evitar variaciones de temperatura. Las operaciones eran llevadas a cabo por Mme. Curie con disciplina y una perfecta armonía de movimientos. Ningún pianista podría haber mostrado mayor virtuosismo que las manos de Mme. Curie en este tipo de trabajo especial. Era una técnica perfecta que tendía a reducir el coeficiente de error personal a cero. (citado por Yuste y Rivas-Caballero, 2016).

Continuó midiendo la radiación emitida por los diversos minerales que le habían proporcionado los colegas de Pierre y encontró que la intensidad de la radiación era directamente proporcional a la cantidad de uranio que contenían las muestras, pero era independiente del estado sólido o líquido de estas, por lo que intuyó que se trataba de una propiedad intrínseca de los átomos.

Estudió todos los cuerpos químicos conocidos para ver si poseían la misma propiedad del uranio y comprobó que el torio también emitía esa misteriosa radiación. Este resultado había sido ya publicado por un colega alemán un mes antes, pero fue ella quien llamó a este fenómeno «radiactividad» y denominó «radioelementos» a aquellas sustancias (elementos químicos) que presentaban esta propiedad.

Amplió el estudio a todos los minerales de que disponía la Escuela y gracias a ello llegó a trabajar con la pechblenda y comprobó que emitía una radiación de intensidad muy superior a la que le correspondía por su contenido en uranio. Marie tuvo la intuición de que ese mineral debería tener en su composición otra sustancia más radiactiva que el uranio; pensó en un nuevo elemento químico. Como habían estudiado todos los cuerpos conocidos y solo el uranio y el torio eran radiactivos, ella y Pierre pensaron que la hipótesis de un nuevo elemento tenía todos los visos de ser cierta.

Al no pertenecer a la Academia de Ciencias, necesitaban de un académico que presentase en su nombre sus resultados. De nuevo fue el antiguo profesor de Marie, Lippman, quien presentó la hipótesis el 12 de abril de 1898. Pierre abandonó sus trabajos y aunó fuerzas con Marie para encontrar ese nuevo material que contenía la pechblenda.

Una vez formulada la hipótesis, tenían que separar los elementos que contenía la pechblenda, medir su radiactividad y quedarse con la parte más radiactiva, que es donde debería estar ese hipotético elemento. Los profesores de la Escuela les ayudaban con la esperanza de que ningún otro científico se adelantase en el descubrimiento, como había ocurrido con el torio.

Por fin lograron aislar una sustancia mucho más radiactiva que el uranio puro. Pierre le preguntó a Marie cómo quería llamarlo, puesto que lo habían encontrado gracias a su intuición y su pertinaz trabajo. Ella eligió como nombre «polonio», en honor a su patria. Y el 20 de julio del mismo año resonó en la Academia el nombre con el que una mujer, una científica polaca, quería rendir homenaje a su olvidada patria. La comunicación, firmada por el matrimonio Curie, decía así: «Creemos que la sustancia que hemos extraído de la pechblenda contiene un metal no conocido aún, vecino del bismuto por sus propiedades analíticas. Si la existencia de este nuevo metal se confirma, nos proponemos denominarle polonio, del nombre del país de origen de uno de nosotros» (citado por Yuste y Rivas-Caballero, 2016).

Pronto se dieron cuenta de que el polonio, aunque más radiactivo que el uranio, no justificaba la gran radiactividad que emitía la pechblenda. Analizaron el líquido residual, una vez eliminado el polonio, y seguía siendo enormemente radiactivo, por lo que dedujeron que debía contener otro elemento químico nuevo, todavía más radiactivo que el polonio. Lo llamaron «radio», y la comunicación oficial en la Academia tuvo lugar el 26 de diciembre.

Desde que Marie había elegido el tema de tesis, apenas doce meses antes, habían demostrado la existencia de dos elementos nuevos, el polonio y el radio, habían logrado un método nuevo para descubrir elementos midiendo su radiactividad e iniciado en la Academia una secuencia de comunicaciones de interés internacional. Fue el año más fructífero de sus vidas. Sin embargo, como contrapunto, su hermana Bronia y su marido regresan a Polonia, a instalar a los pies de los Cárpatos un hospital para tuberculosos. Un sentimiento de orfandad se asentó en el corazón de Marie.

Para demostrar a la comunidad científica que el polonio y el radio existían, tenían que aislarlos y comunicar sus pesos atómicos. Era más fácil aislar el radio y, como se encontraba en una proporción mínima en la pechblenda, necesitaban toneladas de esta y un lugar más amplio para trabajar. Se trasladaron a un cobertizo acristalado de la Facultad de

Medicina que se consideraba inservible incluso para estudiar cadáveres. Para conseguir la pechblenda, se pusieron en contacto con el gobierno austriaco para solicitar los restos de este material de unas minas en los bosques de Bohemia, donde extraían el uranio para la elaboración del famoso cristal de Bohemia.

Cuando en julio de 1899 llegaron los sacos con los restos de la pechblenda, mezclados con hojas y piñas de los árboles, Marie comprobó que esos residuos eran muy radiactivos. Pierre y Marie se dividieron el trabajo, ella se ocupaba de la parte química y él de la física. Sobre esta época escribió Marie:

No teníamos dinero, laboratorio, ni ayuda para llevar a cabo esta labor importante y difícil. Era como crear una cosa de la nada y si mis años de estudiante habían sido calificados por el marido de mi hermana Bronia como «los años heroicos de la vida de mi cuñada», puedo decir sin exageración que este periodo fue, para mi marido y para mí, la época heroica de nuestra existencia común... No obstante, fue en ese miserable y viejo hangar donde transcurrieron los mejores y más felices años de nuestra vida, enteramente dedicada al trabajo... A veces pasaba el día entero removiendo una masa en ebullición con una barra de hierro casi tan grande como yo. Por la noche estaba rendida de fatiga... Me he visto obligada a tratar hasta 20 kilogramos de materia a la vez. Era un trabajo extenuante transportar los recipientes, transvasar los líquidos y remover durante horas y más horas la materia en una evaporadora de hierro. (citado por Yuste y Rivas-Caballero, 2016).

No sabían que los elementos que extraían minaban día a día su salud. Y decidieron pasar las vacaciones en Polonia para reponerse un poco.

Su situación económica no era muy buena, así que cuando les llegó de Ginebra la propuesta de una cátedra para Pierre y un laboratorio con un puesto para Marie, el sueño de sus vidas, aceptaron. Ante la noticia de su marcha, sus colegas se movilizaron para que Francia no perdiese dos científicos de su talla. A Pierre le ofrecieron una plaza de profesor de Física en la Facultad de Ciencias y a Marie otra en la Escuela Superior de Sévres, donde se formaban las mejores maestras de Francia. Estas propuestas los convencieron para rechazar la oferta suiza y quedarse en París buscando el radio, aunque sus respectivas tareas docentes les restaban mucho tiempo.

Su rutina se vio muy alterada, pues después de un denso día de trabajo regresaban a casa, cenaban, acostaban a la niña, y ambos se

ponían a preparar sus clases del día siguiente. Una noche, después de cenar, decidieron volver al hangar y, al abrir la puerta, el radio apareció ante sus ojos como minúsculas siluetas azuladas flotando en el ambiente. Se sentaron a contemplarlo como si no existiera nada más que ellos dos y ese hangar. Marie logró aislar un decigramo de cloruro de radio puro y determinó su peso atómico: 223,3. Colocaron el radio en el lugar 88 de la tabla periódica de Mendeleiev.

A continuación, se lo comunicó a su padre, quien había estimulado su amor por la ciencia. Él le contestó a vuelta de correo: «¡Ya estás en posesión de sales de radio puro! Si se considera la suma de trabajo que ha sido realizado para obtenerlo, en verdad te digo que es el más costoso de los elementos químicos. Solo hay que lamentar que, al parecer, este trabajo no tenga más que un interés teórico» (citado por Yuste y Rivas-Caballero, 2016).

No vivió para ver lo equivocado de su lamento y las importantes aplicaciones prácticas que tendría ese elemento, que tantas horas había robado a la vida de su hija. Seis días después Marie recibió un telegrama que le anunciaba que su padre había sido sometido a una repentina operación de vesícula y se encontraba muy grave. Inició el largo viaje a Varsovia con la esperanza de poder despedirse de él, pero cuando llegó su mirada querida y perspicaz se había apagado y su voz consoladora había enmudecido para siempre. Enlutada de cuerpo y alma volvió a París y se dedicó con ahínco a redactar su tesis.

2.3. Ética científica: el rechazo a patentar el procedimiento de aislamiento del radio

A principios de 1903, el matrimonio Curie recibió una carta desde Estados Unidos que les planteaba patentar el mecanismo de aislamiento del radio que Marie había desarrollado y que solo ellos conocían. La patente aseguraría económicamente sus vidas y la de sus herederos. Pierre delegó en Marie, verdadera artífice del procedimiento de aislamiento del radio, y ella consideró que los científicos debían publicar siempre de manera íntegra sus investigaciones y que era contrario al espíritu científico obtener beneficio de ello. Renunciaron a la patente: «De acuerdo conmigo, Pierre Curie renunció a sacar provecho material del descubrimiento. No patentamos nada a nuestro favor, y publicamos sin reserva alguna los resultados de nuestras investigaciones, así como los

procedimientos de preparación del radio. Además, hemos dado a los interesados toda clase de noticias solicitadas» (citado por Yuste y Rivas-Caballero, 2016).

Después de tomar tan relevante decisión, salieron con sus bicicletas a tomar aire fresco por el bosque de Clamart y regresaron con un ramillete de flores silvestres para decorar su hogar (figura 5).



Figura 5. El paseo en bicicleta tras una relevante decisión.

En junio del mismo año 1903 viajaron a Londres para dar una conferencia sobre la radiactividad en la Royal Institution. Mientras Pierre hablaba, Marie tuvo que conformarse con escuchar a su esposo defender el trabajo en común. Fue la primera mujer que asistía a esas sesiones, y Lord Kelvin, expresidente de la Royal Institution, la sentó a su lado. Pierre planteó la posible acción terapéutica del nuevo elemento en el tratamiento de lesiones cancerígenas si se incidía de forma selectiva en

el tejido afectado. Era el principio de un nuevo camino: la «curieterapia», conocida hoy como «radioterapia». Desconocían los efectos de la exposición a estas radiaciones, que estaban repercutiendo seriamente en su salud. En Marie se manifestaban como brotes de cansancio y en Pierre, como crisis agudas de reumatismo.

Como fruto de todo este trabajo, el 25 de junio de 1903 Marie se doctoró en Ciencias con mención «muy honorable» (figura 6). Se convirtió así en la primera mujer doctora de la Universidad de París (Sklodowska-Curie, 1903).

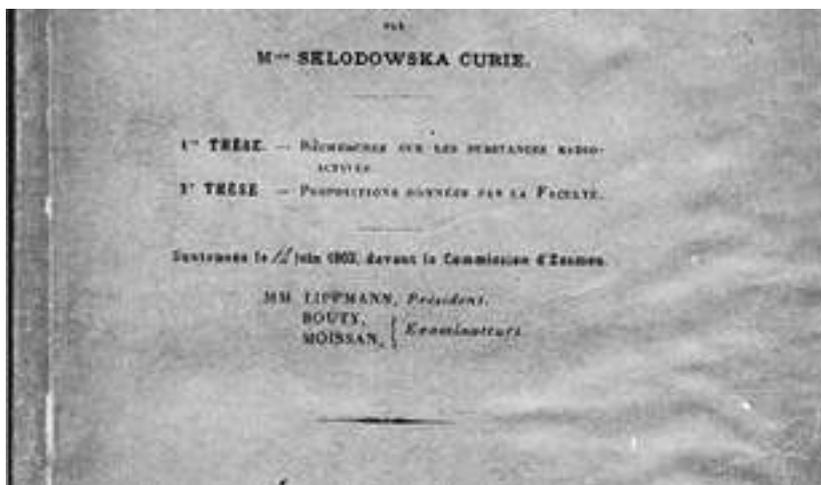


Figura 6. Portada de la tesis de Marie: «Rècherches sur les substances radioactives».

Se fueron por fin de vacaciones. Marie estaba en avanzado estado de gestación y no renunció a pedalear en su querida bicicleta. Bien por los esfuerzos, bien por los efectos de las radiaciones, tuvo un parto prematuro y la bebé murió. La alegría de su doctorado se evaporó. Además, su hermana Bronia acababa de perder a su segundo hijo, víctima de una meningitis tuberculosa.

Abrumada por la sucesión de muertes y viendo la debilidad de su marido, se apoderó de ella la angustia de perderlo, del sinsentido de la vida si uno de ellos faltaba. Estaba convencida de que en una relación como la suya, la falta de uno supondría el hundimiento del otro. Pero Pierre rebatía su tesis y le repetía que aunque fuesen un cuerpo sin alma, había que seguir, continuar la vida propia. Y vino una sucesión de buenas noticias cargadas de alegría.

3. El reconocimiento de su trabajo

En noviembre de 1903, la Royal Institution les concedió a Marie y Pierre la Medalla Davy por sus investigaciones sobre el radio.

En diciembre del mismo año, Becquerel y Pierre recibieron una carta del Comité Nobel anunciándoles que habían sido galardonados con el Premio Nobel de Física, sin hacer mención de Marie. De inmediato, Pierre contestó renunciando al galardón si no se incluía a Marie y adjuntó la tesis que ella acababa de presentar. Superadas las reticencias masculinas, el Comité Nobel incluyó a Marie y, finalmente, la Real Academia Sueca de las Ciencias describió la razón del premio por separado para Becquerel y para los Curie. Becquerel recibió el Nobel por su descubrimiento de la radioactividad espontánea. Y, en el caso de Pierre y Marie Curie, por sus investigaciones conjuntas sobre los fenómenos de la radiación descubiertos por el profesor Henri Becquerel (figura 7). Marie se convirtió en la primera mujer que recibía un Premio Nobel.



Figura 7. Diploma del Premio Nobel de Física de 1903.

Su éxito conllevó la creación de una cátedra de Física en la Universidad de París para Pierre, un laboratorio, unos cuantos ayudantes y un jefe de laboratorio, puesto que fue asignado a Marie. No era el que se merecía, pero al menos se trataba de un puesto remunerado en un laboratorio de investigación de prestigio internacional.

Algunos días después el Instituto de Francia concedió a Marie el Premio Osiris, compartido con el físico e inventor del telégrafo Édouard Branly.

Todos estos premios cambiaron el panorama económico de los Curie y ellos, con la generosidad que les caracterizaba, disfrutaron repartiendo el dinero a muchas personas: en primer lugar a sus hermanos, especialmente a Bronia para que pudiera acabar la construcción del sanatorio a los pies de los Cárpatos, a los ayudantes del laboratorio, a las alumnas de Sévres, a estudiantes polacos en París, y a un largo etcétera.

Una nueva alegría llegó a su casa: el 6 de diciembre de 1904 nace su segunda hija, Ève, que el tiempo mostraría bien distinta de su madre y de su hermana. No estaba interesada por los temas científicos, tenía un carácter más extrovertido y unos gustos más mundanos. Fue una excepcional pianista y autora de la primera gran biografía de su madre (E. Curie, 1986).

El matrimonio Curie, con la ayuda del abuelo, continuó con su proyecto de caracterizar los dos nuevos elementos químicos que habían descubierto, pero Marie se permitió algún respiro para poder disfrutar de sus niñas y de sus amigos. Se les vio en el teatro, en conciertos o en reuniones de intelectuales.

4. El trágico accidente

El 19 de abril de 1906 un desgraciado accidente mortal deja a Marie sola con sus proyectos, su familia; sola ante la vida. Pierre muere atropellado por un carro tirado por dos caballos percherones, que cargaba 6 toneladas de uniformes militares en la calle Dauphine, con solo 49 años.

Para adaptarse a la nueva vida, Marie se refugió en el trabajo y comenzó un diario dedicado a Pierre, en el que le relataba el dolor de su ausencia, y lo hacía partícipe de su vida sin él:

Pierre, Pierre mío, estás ahí... aún eres tú, encerrado en un sueño del que ya no puedes salir... he puesto mi último beso sobre tu frío rostro, siempre amado. Luego algunas flores sobre tu ataúd y el retrato de la «pequeña estudiante sensata» que amabas tanto. Es el retrato de aquella que tuvo la dicha de gustarte tanto, que no dudaste en ofrecerle compartir tu vida cuando apenas la habías visto algunas veces. Me has dicho a menudo que fue la única vez en tu vida en

que actuaste sin dudar, con la convicción absoluta de que obrabas bien. Pierre mío, creo que no te equivocaste. Estábamos hechos para vivir juntos... Todo ha terminado. Pierre duerme su último sueño bajo tierra. Es el final de todo, de todo, de todo... (citado por Yuste y Rivas-Caballero, 2016).

Rechazó todo intento de cimentar su nueva vida sobre el fatídico accidente. No aceptó una pensión nacional como la que se le había otorgado a la viuda de Pasteur, argumentando que era joven y que podía ganarse la vida y la de sus hijas (figura 8). Por la misma razón, tampoco aceptó que se iniciara una suscripción nacional para edificar un gran laboratorio. Sin embargo, sí aceptó ocupar la cátedra de Física creada para Pierre, convirtiéndose en la primera profesora de la Universidad de París. Asimismo, pasó a dirigir el laboratorio que les concedieron con motivo del Premio Nobel, con lo que se convirtió también en la primera directora de un laboratorio en dicha universidad.



Figura 8. Marie Curie con sus hijas, Irène y Ève.

Publicó las obras completas de Pierre, revisadas por ella (P. Curie, 2012), y retomó sus investigaciones sobre el radio y el polonio (figura 9). En 1909 el Instituto Pasteur y la Universidad de París se unieron para financiar la construcción del Instituto del Radio, que tuvo dos áreas de trabajo diferentes: el Pabellón Curie, dedicado

al estudio de la radiactividad, dirigido por ella desde 1914 hasta su muerte en 1934, y el Pabellón Pasteur, dedicado a la aplicación terapéutica del radio, dirigido por el doctor Claude Regaud.



Figura 9. Marie trabajando en su laboratorio.

5. 1911: un año de humillación y gloria

En 1911 Marie presentó su candidatura a una plaza vacante en la Academia de Ciencias (vetada a las mujeres), esperando que, por un lado, Francia reconociera sus méritos científicos y que, por otro, su laboratorio se beneficiara, puesto que ella misma podría presentar los trabajos realizados por su equipo. La Academia se dividió en dos bandos y, después de dos votaciones, fue rechazada por un voto. Como la Academia le cerró sus puertas, ella nunca más intentó abrirlas. A partir de ese momento no pidió nada para sí y

solo aceptó aquellos nombramientos que por sus méritos le fueron espontáneamente concedidos en distintos lugares del mundo.

En octubre de 1911 asiste al primer Congreso Solvay (Bruselas), organizado por un mecenas belga que había invitado a los mejores físicos del mundo para que debatieran sobre temas importantes. La primera reunión se dedicó a la radiactividad y Marie fue la única mujer participante (figura 10).



Figura 10. La primera reunión Solvay dedicada a la radiactividad.

Mientras tanto, en París el periódico francés *Le Journal* publicó una noticia titulada: «Una historia de amor: Mme. Curie y el Profesor Langevin», basada en una denuncia de la esposa de Langevin. Sus enemigos, xenófobos, que no admitían a una polaca como la científica francesa de mayor relieve mundial, aprovecharon la ocasión para denigrarla hasta extremos insospechados. Tuvo el apoyo incondicional de sus hermanos, de Jacques, el hermano de Pierre, y del círculo científico al que había pertenecido Pierre Curie y al que pertenecían tanto ella como Paul Langevin.

Sufrió una fuerte depresión, que la condujo al borde del suicidio. Acompañada de su hermana y escudada en el anonimato de su apellido polaco, Sklodowska, comenzó una peregrinación en busca de

reposo y paz, mientras sus hijas eran atendidas por una institutriz polaca.

Entre muchas cartas y muestras de apoyo, recibió una de Albert Einstein:

Siento la necesidad de decirle lo mucho que admiro su espíritu, su energía y su honradez. Me considero afortunado por haber podido conocerla personalmente en Bruselas... Siempre agradeceré que tengamos entre nosotros gente como usted... Si la chusma sigue ocupándose de usted, deje sencillamente de leer estas tonterías. Que se queden para las víboras para quienes han sido fabricadas. (citado por Yuste y Rivas-Caballero, 2016).

Desde Polonia le ofrecieron dirigir un laboratorio, pero no aceptó la oferta porque no abandonaría París huyendo. Sus hijas eran francesas, ella había desarrollado su labor científica en Francia y estaba en construcción el Instituto del Radio, el sueño de Pierre y de ella misma. Propuso dirigir el laboratorio polaco desde París.

En este mismo año había recibido un telegrama de la Academia sueca con la notificación de que le había sido concedido el Premio Nobel de Química en reconocimiento a sus servicios al avance de la Química con el descubrimiento de los elementos radio y polonio, por el aislamiento del radio y el estudio de la naturaleza de los compuestos de este elemento notable.

Cuando el escándalo mediático llegó a Estocolmo, la Academia sueca le propuso que no aceptase el galardón, a lo que ella contestó:

La acción que usted me recomienda sería un grave error por mi parte. De hecho, el premio me ha sido concedido por el descubrimiento del radio y del polonio [...] No puedo aceptar, por principio, la idea de que la valoración del trabajo científico pueda estar influenciada por el libelo y la calumnia acerca de mi intimidad. Estoy convencida de que mucha gente comparte esta misma opinión; me entristece profundamente que no se encuentre usted entre ellos. (citado por Yuste y Rivas-Caballero, 2016).

El 10 de diciembre de 1911, acompañada de su hija Irène y de su hermana Bronia, recibió el galardón de manos del rey de Suecia, Gustavo V (figura 11).



Figura 11. Diploma del Premio Nobel de Química de 1911.

6. La Gran Guerra

En 1914, a punto de inaugurar el Pabellón Curie del Instituto del Radio, estalló la Primera Guerra Mundial. Ante la amenaza de la ocupación alemana, la población abandona París. Sus hijas la esperaban en Bretaña para pasar las vacaciones, pero ella decidió quedarse en París para poner sus conocimientos al servicio de su patria de adopción. Una vez más antepone los intereses generales por encima de los suyos.

Creó para el ejército francés los *petites Curie* (figura 12): vehículos a los que incorporó una dinamo y un aparato portátil de rayos X, inventado por el ingeniero español Mónico Sánchez (1880-1961). Aprovechando que el hierro necesario para hacer un transformador es mucho menor si en lugar de usar 50 Hz, utiliza 7 MHz, el peso del aparato se reducía a tan solo 10 kg, ocupando el tamaño de una simple maleta. Este aparato podía funcionar con el motor del coche. De esta manera, se pudieron hacer placas radiográficas allí donde estaban los heridos.

Marie creó unos doscientos puestos fijos y unos veinte móviles que se acercaban a la línea del frente. Aprendió a conducir y la mecánica imprescindible para manejar un automóvil. Contó con el apoyo de su hija Irène, que tenía solo 17 años. Ambas impartieron cursos teórico-prácticos a jóvenes para que pudieran hacerse cargo de las unidades.

Gracias a estas unidades radiológicas pudieron salvar la vida de muchos soldados y reducir su sufrimiento.

El 11 de noviembre de 1918 finaliza la guerra. Ella se encuentra trabajando en su laboratorio y, montada en su *petite Curie*, recorre los Campos Elíseos para festejar la paz.



Figura 12. Los *petites Curies*.

Por el Tratado de Versalles, Polonia resurgió como nación libre, después de 123 años de ocupación, y Marie decide visitar a sus hermanos. Al respecto, escribió: «La victoria obtenida a costa de tanto sacrificio me causó una gran dicha: la reparación de la injusticia que había sufrido Polonia, mi país natal. Para festejar su libertad viajé a Varsovia al encuentro de mi familia, después de muchos años de separación» (citado por Yuste y Rivas-Caballero, 2016).

7. Marie, embajadora de la ciencia

Asiste a los sucesivos Congresos Solvay, en los que casi siempre era la única mujer presente (Sánchez, 2009).

En 1921, por iniciativa de la periodista norteamericana Mary Meloney se hizo una suscripción popular entre las mujeres americanas y se consiguió financiar un gramo de radio para el Instituto Curie de París. Marie, que había desarrollado el procedimiento de obtención del radio,

no tenía los medios económicos necesarios para fabricarlo. Regresa a Francia con un nuevo concepto de la fama, que pasa de ser considerada como un obstáculo para su vida y su trabajo a una aliada para la difusión de la ciencia. Se convierte así en embajadora de la ciencia.

La nombraron miembro de la Academia francesa de Medicina en 1922, convirtiéndose en la primera mujer que entraba en una Academia, y vicepresidenta del Comité de Cooperación Intelectual de la Sociedad de Naciones, precursora de la ONU.

En 1923 por fin Francia le rinde un homenaje oficial por el 25 aniversario del descubrimiento del radio. Por votación unánime de las dos Cámaras (Asamblea Nacional y Senado), se le concede una pensión de 40 000 francos como recompensa nacional. El homenaje tuvo lugar en La Sorbona y a él asistió una representación al más alto nivel de la sociedad francesa, incluido el presidente de la República. Ella expresó su inmensa gratitud y con serenidad recordó al coprotagonista ausente, su esposo Pierre Curie. Pidió apoyo para que el Instituto del Radio y el legado de ambos sobrevivieran a su muerte y a la de las generaciones venideras.

Asiste en 1925 a la colocación de la primera piedra del Instituto del Radio de Varsovia. Y en 1929, el Presidente Hoover de Estados Unidos le entrega un gramo de radio en la Casa Blanca para dicho instituto.

Su hija Irène se casó en 1926 con Frédéric Joliot, investigador del equipo del Instituto del Radio. Un año después nació su nieta Hélène.

En 1932 viajó a Varsovia para inaugurar el Instituto del Radio que lleva su nombre, y nació su nieto Pierre.

Irène y Frédéric descubrieron en 1934 la radiactividad artificial, por la que en 1935 recibieron el Premio Nobel de Química. El premio fue otorgado por sintetizar nuevos elementos radiactivos, es decir, por el descubrimiento de la radiactividad artificial, pero Marie desgraciadamente no llegó a saberlo.

Marie recorrió el mundo entero. En España estuvo en tres ocasiones:

- Abril de 1919. Participa en el I Congreso Nacional de Medicina. Imparte una conferencia en el Anfiteatro de San Carlos, la antigua Facultad de Medicina de la Universidad de Madrid, titulada «El radium y sus aplicaciones». La nombraron presidenta de honor de la Real Sociedad de Radiología y directora honoraria del Instituto de Radiactividad. Recibió de Alfonso XIII la Cruz de la Orden de Alfonso XII.

- Abril de 1931. Recién instaurada la II República, viajó con su hija Ève. Impartió en la Residencia de Estudiantes de Madrid la conferencia: «La radiactividad y la evolución de la Ciencia». Simultáneamente, una carta llegaba a su casa en París, en la que era nombrada Académica Correspondiente Extranjero de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (este nombramiento, que ella no pudo recoger en vida y que fue ignorado por la Academia durante ochenta años, fue recogido por su nieto Pierre en 2012 y se encuentra en la actualidad expuesto en el Museo Curie de París).
- Mayo de 1933. Invitada por el gobierno de la II República como vicepresidenta del Comité de Cooperación Intelectual de la Sociedad de Naciones, presidió el debate internacional sobre «El porvenir de la cultura» en la Residencia de Estudiantes. En él se dieron cita pensadores, escritores y artistas de todo el mundo: Miguel de Unamuno, Salvador de Madariaga, Gregorio Marañón, el compositor polaco Karol Szymanowski, el poeta francés Paul Valéry, entre otros.

7. El último suspiro

En mayo de 1934, trabajando en su laboratorio, Marie se siente muy debilitada y, pensando que se trata de tuberculosis, la llevan a un sanatorio francés en los Alpes, cerca de la frontera suiza. Allí se le diagnostica anemia perniciosa aplásica. No se puede hacer nada y muere el 4 de julio. Es enterrada en el cementerio de Sceaux, al sur de París, junto a su marido Pierre, en la más estricta intimidad (figura 13). Sus hermanos echaron sobre el ataúd un puñado de tierra polaca.

Personalidades de todo el mundo dieron su adiós a esta mujer universal. Entre ellos, su amigo y colega Albert Einstein escribió la siguiente carta:

Cuando una personalidad tan destacada como Mme. Curie llega al fin de sus días, no debemos darnos por satisfechos solo con recordar lo que ha dado a la Humanidad con los frutos de su trabajo. Las cualidades morales de una personalidad tan destacada como la suya quizá tengan un significado mayor para nuestra generación y para el curso de la historia que los triunfos puramente intelectuales. Hasta estos últimos dependen, más de lo que suele creerse, de la talla del personaje.

[...] Se consideraba servidora de la sociedad, y su gran modestia jamás cedía a la complacencia. Le agobiaba un sentimiento profundo de las crueldades y desigualdades de la sociedad. Era esto lo que le daba aquel aspecto exterior severo, que tan fácilmente confundía a quienes no la conocían... Cuando consideraba correcta determinada vía, la seguía con tremenda tenacidad.

[...] El mayor descubrimiento de su vida (demostrar la existencia de elementos radiactivos y aislarlos) no solo se debe a su audaz intuición sino a su entrega y tenacidad en la tarea bajo unas condiciones que pocas veces se han dado en la historia de la ciencia experimental. Si la fuerza de carácter y la devoción de Mme. Curie estuviesen vivas en los intelectuales europeos, aunque solo fuese en una pequeña proporción, Europa tendría ante sí un futuro más brillante. (citado por Yuste y Rivas-Caballero, 2016).

El 20 de abril de 1995 los restos mortales de Pierre y Marie fueron trasladados al Panteón de Hombres Ilustres de Francia, en París (figura 5) (Yuste y Rivas Caballero, 2016).



Figura 13. Tumbas de Pierre y Marie Curie en el Panteón de París.



Figura 14. Estatuas de Pierre y Marie Curie en el Instituto del Radio de París.

Nuevamente vuelve a protagonizar una «primera vez» como a lo largo de toda su vida: la primera en doctorarse en Física en la Universidad de la Sorbona, la primera titular de una cátedra universitaria, la primera en recibir el Premio Nobel de Física y el de Química, la primera que lo obtuvo dos veces, la primera en ingresar en una Academia científica, la primera en ser Doctora Honoris Causa por multitud de universidades..., y en 1995, sesenta y un años después de su muerte, la primera mujer cuyos restos descansan entre los de los hombres ilustres de Francia.

Bibliografía

- CURIE, ÈVE (1986): *La vida heroica de Marie Curie, descubridora del radio*, Madrid: S.L.U. Espasa Libros. ISBN: 978-84-2390-451-8.
- Pierre Curie: With Autobiographical Notes by Marie Curie* (2012), New York: Ed. Dover. Reedición de la publicada en 1923 por Macmillan Company, New York. ISBN: 978-0-486-20199-3.
- SÁNCHEZ RON, JOSÉ MANUEL (2009): *Marie Curie y su tiempo*, Barcelona: *Crítica*. ISBN: 978-8-498-92010-9.
- SKLODOWSKA-CURIE, MARIE (1903): *Recherches sur les substances radioactives* (tesis doctoral), Paris: Gauthier-Villars.
- YUSTE, BELÉN y SONNIA L. RIVAS-CABALLERO (2016): *María Sklodowska-Curie. Ella misma*, Madrid: Ediciones Palabra. ISBN: 978-84-9061-404-4.



Augustin Fresnel: 200 años de la teoría de la difracción de la luz

MANUEL YUSTE,* CARMEN CARRERAS**

Introducción

En el transcurso del VII Tíbero, que se celebró en La Habana del 7 al 11 de marzo de 2016, presentamos una comunicación para conmemorar una de las efemérides del Año Internacional de la Luz y de las Tecnologías basadas en la Luz, que versaba sobre la contribución de Fresnel a la teoría de la difracción (Carreras, Sánchez-Fernández y Yuste, 2016). En la presente ocasión retomamos el tema para celebrar el segundo centenario del Premio de la Academia de Ciencias de París del año 1818, que fue otorgado a este gran científico por su contribución al avance de la Ciencia. Trazaremos brevemente su biografía y nos referiremos a sus aportaciones más importantes en la óptica durante los doce años escasos que dedicó a la investigación en este campo, tales como las integrales, las fórmulas y las lentes que llevan su nombre.

1. Breve biografía

Augustin Jean Fresnel (figura 1) nació el 10 de mayo de 1788 en Broglie (Normandía). Fue el segundo de los cuatro hijos de la familia Fresnel-Merimée. Su padre, el arquitecto normando Jacques Fresnel, se trasladó a Broglie para restaurar el Castillo del Mariscal de Francia, Victor de Broglie a la que sería su esposa, Charlotte Augustine Mérimée, tía de Prosper Mérimée, autor de la novela Carmen, que inmortalizó Bizet en una famosa ópera).

* Departamento de Física Interdisciplinar, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), Madrid, España.

La familia de Fresnel era muy piadosa y abrazaba el jansenismo (corriente de espiritualidad cristiana que creía en la predestinación y se caracterizaba por una exigencia de vida virtuosa y ascética). Sus padres le proporcionaron una educación muy estricta y religiosa. Era un niño de salud delicada y con pocas aptitudes para el estudio, no aprendió a leer hasta la edad de ocho años y tenía mucha dificultad para memorizar.



Figura 1. Augustin Jean Fresnel.

En 1801 inició sus estudios de educación secundaria en Caen y se interesó por la ciencia, mostrando una gran aptitud hacia las matemáticas. Acabó clasificado el número 17 entre los 130 estudiantes de su curso.

Siguiendo el ejemplo de su abuelo, de su padre y de sus hermanos, ingresó en la Escuela Politécnica de París en 1804. Su formación en este centro fue desigual: casi nula en Física y excelente en Matemáticas. Entre sus profesores se encontraban grandes matemáticos de la época, como Poisson y Legendre, y un gran experimentador, François Arago, que desempeñó un papel muy importante en su trayectoria científica. Su primera publicación apareció en *La Correspondance sur l'École Polytechnique* y trataba sobre la resolución de un problema matemático propuesto por Legendre.

En 1806 ingresó en la École Nationale des Ponts et Chaussées. Creada en 1747, es la escuela de ingeniería civil más antigua del mundo que se mantiene en funcionamiento, así como una de las más prestigiosas. Por sus aulas pasaron personajes como Agustín de Betancourt –ingeniero canario, creador y director de la Escuela de Ingenieros de Caminos y Canales (1802) en España, director del Departamento de Vías de Comunicación de Rusia–, Gay-Lussac, Poisson, Cauchy, Coriolis, Becquerel, entre otros muchos.

Fresnel fue enviado en 1809 a construir carreteras por diferentes departamentos de Francia y en 1812 fue nombrado ingeniero y terminó el tramo de la carretera nacional Briançon-Pont-Saint-Esprit, que une Italia con España a través del sur de Francia. En una carta enviada a su tío le dijo que administrar, gestionar y dirigir a los trabajadores le aburría, que dedicaba su tiempo libre a la investigación científica, a pesar de no disponer de un laboratorio. Empezó con experimentos de química, dado su desconocimiento de la física, pero tres años después cayó en sus manos un trabajo de Biot sobre la polarización de la luz, que le interesó sobremanera.

En marzo de 1815 Napoleón regresó de su exilio en la isla de Elba y volvió a tomar el poder. Fresnel, que había apoyado la monarquía borbónica, fue inmediatamente despedido de su cargo. Sin embargo, se le permitió volver a la casa familiar con su madre y residir en París. Decidió consagrar su tiempo libre a la ciencia y entró en contacto con François Arago, que ya era un científico influyente. Este fue el inicio de su brillante carrera científica.

2. Encuentro con la óptica

Ejerció su profesión de ingeniero paralelamente al desarrollo de sus trabajos científicos, realizados sobre todo en el campo de la óptica. Aunque desconocía los trabajos de Young sobre las interferencias luminosas, sus experimentos, realizados con materiales rudimentarios, le permitieron llegar a las mismas conclusiones sobre el carácter ondulatorio de la luz.

A finales de 1815 envió dos memorias a la Academia de Ciencias (figura 2), una sobre las interferencias luminosas y otra sobre la teoría de los colores producidos por una superficie «estriada», a la que Joseph von Fraunhofer denominaría diez años más tarde «red de difracción».

Tras la caída de Napoleón a los cien días de su regreso, se reincorporó a su puesto de ingeniero y fue asignado a Ille-et-Vilaine para supervisar los «ateliers de charité» de Rennes, destinados a proporcionar trabajo a los indigentes. Más tarde pasó a estar empleado en el Canal d'Ourcq y, en 1818, en las Oficinas del Catastro de París.



Figura 2. Academia de Ciencias de París.

Respaldo por Arago, presentó ante la Academia de Ciencias una comunicación muy matemática sobre la difracción de la luz, respon-

diendo a la convocatoria realizada por la propia Academia en 1817. Su memoria se basaba en la naturaleza ondulatoria de la luz, contrariamente a las ideas predominantes en la época, que se inclinaban en favor de una teoría corpuscular o newtoniana.

El jurado estaba compuesto por grandes científicos como Laplace, Biot, Poisson, Arago y Gay-Lussac. Poisson solo se convenció del acierto de la teoría de Fresnel tras un experimento decisivo. Hizo notar que, según Fresnel, la intensidad de la luz difractada por un pequeño disco opaco tendría un máximo (punto brillante) en el centro geométrico de su sombra. La intuición sugería que no debería haber ningún punto brillante en el centro de la sombra, por lo que sería falsa la teoría.

Sin embargo, el experimento realizado por Arago ante el jurado, en el que aparecía claramente el punto brillante en la sombra del disco, confirmó por completo la teoría de Fresnel, quien obtuvo el Premio de la Academia de Ciencias y recibió de manera pública las felicitaciones de Laplace, defensor de la teoría corpuscular de la luz.

2.1. Las integrales de Fresnel

Analicemos ahora con un poco más de detalle la gran contribución de Fresnel a la teoría ondulatoria de la luz. Ya hemos señalado que, utilizando las ideas de Young sobre la interferencia luminosa y la construcción de Huygens para el avance de las ondas, Fresnel enunció el principio de difracción en 1817 para concursar en el Premio de la Academia de Ciencias de París (Carreras, Sánchez-Fernández y Yuste, 2016).

Al aplicar este principio a la difracción de la luz por un obstáculo de pequeñas dimensiones, Fresnel hizo una serie de aproximaciones en el cálculo, lo que lo condujo a introducir unas integrales que desde entonces se conocen como «integrales de Fresnel», dos de cuyos ejemplos más notables son los siguientes (Goodman, 2008):

$$S(q) = \int_0^q \text{sen}\left(\frac{\pi}{2}\mu^2\right) d\mu \tag{1}$$

$$C(q) = \int_0^q \text{cos}\left(\frac{\pi}{2}\mu^2\right) d\mu \tag{2}$$

Estas integrales aparecen al calcular la amplitud de la onda difractada en el punto (figura 3, el plano de la figura lo hemos tomado como plano $\{X, Y\}$ y el origen de coordenadas lo hemos situado en el centro de la rendija). En estas condiciones las coordenadas del punto en cuestión son $P = (D, y)$ y un punto genérico de la rendija se escribe como $(0, \eta)$, con $-\alpha / 2 \leq \eta \leq +\alpha / 2$, donde α es su anchura.

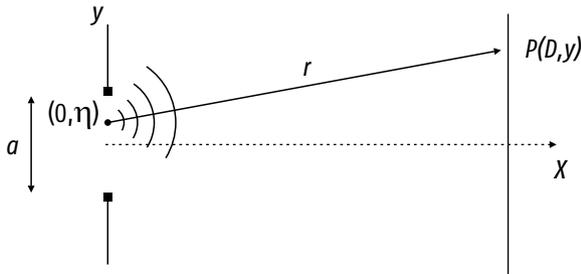


Figura 3. Difracción por una rendija.

La amplitud es proporcional a un término exponencial (fase temporal de la onda) multiplicado por la integral de las ondas elementales esféricas que salen de la rendija y que llegan en el mismo instante al punto P :

$$E \propto e^{i\omega t} \int_{-\alpha/2}^{\alpha/2} \frac{1}{r} e^{-ikr} d\eta \quad (3)$$

donde $k = 2\pi / \lambda$ es el vector de onda y r la distancia entre el punto de $(0, \eta)$ la rendija y el punto P :

$$r = \sqrt{D^2 + (y - \eta)^2} \quad (4)$$

Si la anchura de la rendija es del orden del milímetro y la distancia D es del orden de una veintena de centímetros (lo que es habitual en los experimentos), las distancias y correspondientes a cada uno de los puntos de la rendija son prácticamente iguales, y el término $(1/r)$ del integrando puede sacarse fuera de la integral, ya que puede tomarse como constante porque su variación es inferior a una centésima de la distancia D a la pantalla. Esta aproximación no se debe hacer en el término de la exponencial,

ya que una variación de un milímetro en r representa un cambio de unos centenares de radianes en la fase espacial, puesto que la distancia está dividida por la longitud de onda λ de la luz, que es del orden de la micra.

El término $(1/r)$ del integrando responde al hecho de que las onditas secundarias de Huygens son esféricas y su amplitud debe ser proporcional a la inversa de la distancia a la fuente de la onda para que la energía se conserve. El término exponencial corresponde a una onda plana (onda cosenoidal) y lo que hace Fresnel en el punto P es, por lo tanto, integrar las ondas elementales que llegan a él como si fueran planas.

La distancia r se puede escribir de la siguiente manera:

$$r = D\sqrt{1+\rho^2} \text{ con } \rho = (y - \eta) / D \tag{5}$$

Puesto que $|\rho| \ll 1$, podemos desarrollar el radical por el teorema de Taylor y quedarnos con el segundo orden del desarrollo, obteniendo para r la siguiente expresión:

$$r = D (1 + \rho^2 / 2) \tag{6}$$

Esto permite expresar la amplitud de la onda resultante de la suma de todas las onditas que llegan al punto P de la siguiente manera:

$$E\alpha e^{i\omega t} e^{-ikD} \int_{\rho^1}^{\rho^2} F(\rho^2) d\rho \tag{7}$$

Para ello se ha hecho un cambio de variables entre η y ρ y se han sacado fuera de la integral los términos constantes. El integrando de (7) es la función exponencial imaginaria desarrollada en sus dos componentes trigonométricas:

$$F(\rho^2) = \cos\left(\frac{kD}{2}\rho^2\right) - i\text{sen}\left(\frac{kD}{2}\rho^2\right) \tag{8}$$

El argumento de las funciones trigonométricas se puede identificar con el de las integrales de Fresnel indicadas en las expresiones (1) y (2) de la siguiente manera:

$$(kD / 2)\rho^2 = (\pi / 2)\mu^2 \tag{9}$$

quedando, finalmente, la amplitud de la onda difractada en el punto P en función de las integrales de Fresnel como:

$$E \propto e^{i\omega t} e^{-ikD} [C(q) - iS(q)] \quad (10)$$

La intensidad de la luz difractada en el punto P , que es proporcional al promedio temporal del cuadrado del módulo de la amplitud, tiene la siguiente expresión:

$$I \propto C^2(q) + S^2(q) \quad (11)$$

en la que las integrales de Fresnel dependen de los límites de integración q que, a su vez, vienen definidos por los distintos parámetros del problema: la anchura α de la rendija, la coordenada del punto P y la distancia D entre la rendija y la pantalla de observación.

Estas integrales solo se pueden resolver por métodos numéricos. En la época de Fresnel se dedicaron a hacerlo y así pudieron obtener las distribuciones de intensidad de la luz difractada por una serie de objetos geométricos de elevada simetría. El análisis de la distribución espacial de esta intensidad proporciona, con una magnífica precisión, el tamaño y la forma de los objetos que han producido las imágenes de difracción (Carreras, Sánchez-Fernández y Yuste, 2016).

La difracción ha influido mucho en el desarrollo de la investigación científica y gracias a ella se han podido calcular las formas y tamaños de las redes cristalinas (ley de Bragg), la forma de hélice del ADN, etc. Por ejemplo, se puede obtener la difracción de un conjunto de glóbulos rojos y determinar su tamaño.

Esto fue propuesto por primera vez por el doctor J. E. Parks en 1979 en la revista *Physics Teacher*. El título de la propuesta era «If Dracula had a Laser», y obtuvo el premio de ese año a la mejor propuesta experimental. En la figura 4 se puede ver una imagen de la difracción del glóbulo rojo obtenida en el laboratorio docente de óptica de la UNED.

En la actualidad, el desarrollo de la informática permite hacer gran número de integraciones numéricas, por lo que se puede obtener información sobre la morfología de objetos pequeños, microscópicos y submicroscópicos. Todo depende de la radiación de que se disponga. A esto ayuda que se pueda aplicar el principio de superposición al estudio de la difracción de un objeto complejo formado por la combinación de otros más sencillos. El efecto de la difracción se lo debemos

a Fresnel, pero la aplicación del principio de superposición hemos de agradecerla a Maxwell, que planteó las ecuaciones del campo electromagnético con operadores lineales.

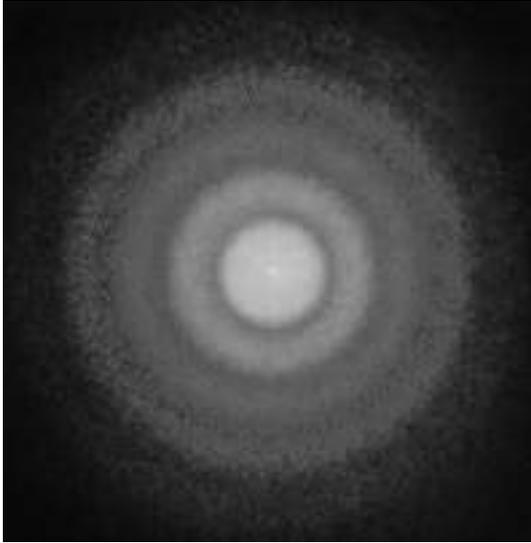


Figura 4. Difracción de la luz por un glóbulo rojo.

Interferencia y tiempo de respuesta del detector

Si tenemos dos ondas planas, E_1 y E_2 :

$$E_1 = E_{01} e^{i(\omega_1 t - k_1 r_1)} \tag{12}$$

$$E_2 = E_{02} e^{i(\omega_2 t - k_2 r_2)} \tag{13}$$

donde ω_1 y ω_2 son las frecuencias angulares k_1 y k_2 los vectores de onda, al sumarse en un punto pueden interferir, dependiendo el término de interferencia del tiempo de respuesta τ del detector y de la diferencia $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$ entre sus frecuencias. Al calcular la intensidad I de la suma de las ondas como el promedio temporal del cuadrado de la amplitud suma en el intervalo de tiempo τ , aparece, entre otras, la siguiente integral definida:

$$\frac{1}{\tau} \int_0^\tau \cos(\Delta\omega t - \delta) dt = \frac{1}{\Delta\omega\tau} [\text{sen}(\Delta\omega\tau - \delta) + \text{sen}\delta] \tag{14}$$

por lo que obtenemos la siguiente expresión para la intensidad de la interferencia:

$$I = I_{01} + I_{02} + 2\sqrt{I_{01}I_{02}} \frac{\text{sen}(\Delta\omega\tau - \delta) + \text{sen}\delta}{\Delta\omega\tau} \quad (15)$$

donde I_{01} e I_{02} son las intensidades de las ondas actuando por separado, siendo δ el desfase entre ellas.

Cuando $\Delta\omega\tau \rightarrow 0$, la fracción que aparece en el término interferencial se convierte en una indeterminación 0/0 que se resuelve por la regla de L'Hôpital, obteniéndose para la intensidad de interferencia la conocida fórmula de Young:

$$I = I_{01} + I_{02} + 2\sqrt{I_{01}I_{02}} \cos\delta \quad (16)$$

Si $\Delta\omega \rightarrow 0$, se trata de la interferencia de ondas de la misma frecuencia, y es la situación ideal de cualquier interferómetro.

Si $\tau \rightarrow 0$ obtendríamos la misma fórmula (16), pero la interferencia se produciría para cualquier pareja de ondas de distinta frecuencia. Se trataría de una situación de detección instantánea que no tiene sentido físico: el tiempo τ de respuesta del detector es siempre distinto de cero.

Esta última consideración nos permite preguntarnos cuál sería la diferencia máxima $\Delta\omega$ para un determinado tiempo de respuesta τ para que haya interferencia. Del análisis de la fracción que aparece en la expresión (15) deducimos que, para que el término interferencial tenga un valor significativo frente a I_{01} e I_{02} , el denominador tiene que ser igual o menor que 2 en valor absoluto, valor máximo posible de la suma de los senos del numerador. Por lo tanto, para un tiempo τ dado, se ha de cumplir la siguiente relación:

$$\Delta\omega \cong 2/\tau \quad (17)$$

Para el ojo humano, $\tau = 4 \times 10^{-2}$ s, lo que quiere decir que $\Delta\omega \cong 50$ Hz. En el caso de la línea D_1 del doblete amarillo del sodio, $\lambda_1 = 589,0$ nm, es decir $\omega_1 = 5,093 \times 10^{14}$ Hz, la diferencia $\Delta\lambda_1$ con la longitud de onda que podría interferir con ella sería:

$$\Delta\lambda_1 \cong 6 \times 10^{-11} \text{ nm} \quad (18)$$

La otra longitud de onda del doblete, $\lambda_2 = 589,6 \text{ nm}$, no podría interferir con λ_1 . Incluso si se dispusiera de un fotómetro que tuviera un tiempo de respuesta $\tau = 10^{-9} \text{ s}$, $\Delta\lambda_1 \cong 2,3 \times 10^{-3} \text{ nm}$, tampoco se produciría la interferencia entre las dos componentes del doblete.

Difracción y longitud de onda

Cuando Fresnel realiza el promedio temporal de la intensidad en su cálculo para la difracción, la expresión resultante deja de depender de la frecuencia de la onda difractada y solo depende de las dimensiones del obstáculo, del punto de observación y de la longitud de onda de la radiación. Este último aspecto proporciona un método para medir el cambio de la longitud de onda cuando cambia el medio de propagación.

Si colocamos una red de difracción de 300 líneas/mm en el centro geométrico de un vaso cilíndrico y hacemos incidir un rayo láser de He-Ne sobre ella ($\lambda = 632,8 \text{ nm}$), al observar los máximos principales de la difracción que produce la red en una pantalla situada a 3 m, la distancia entre los dos máximos principales de primer orden resulta ser de 1,16 m. Si a continuación vertemos agua en el vaso hasta cubrir la red, la distancia entre los dos máximos principales se reduce claramente pasando a ser de 0,87 m. Esta drástica disminución se debe a que la longitud de onda de la radiación se ha reducido al propagarse en el agua. La teoría de la difracción permite determinar estas longitudes de onda midiendo el ángulo θ de difracción para los máximos principales de primer orden:

$$\text{sen } \theta = \pm \frac{\lambda}{\alpha} \tag{19}$$

donde α es la constante de la red, la inversa del número N de líneas/mm (en este caso, $\alpha = 3,33 \mu\text{m}$).

El experimento, que fue propuesto por A. Bodeken en 1974 en *American Journal of Physics*, fue posteriormente desarrollado y mejorado por nosotros en un comentario a su propuesta en la misma revista (Yuste y Carreras, 1986). En él se muestra cómo se pueden determinar con la difracción las longitudes de onda en diversos líquidos y, lo que es más importante, se demuestra que la frecuencia, que está asociada al origen de la onda, no cambia al propagarse la luz en distintos medios. Lo que cambia es la longitud de onda, que está asociada al medio de propagación.

2.2. Las ecuaciones de Fresnel

La difracción explicaba, como hemos dicho, la mayoría de los fenómenos luminosos conocidos, sin embargo, como se pensaba que las ondas luminosas eran como las del sonido, longitudinales, no podían explicar la polarización de la luz por reflexión, que había sido descubierta por Malus al observar a través de un polarizador el reflejo de la luz solar en un vidrio de ventana: la luz se extinguía al hacer girar el polarizador en el plano perpendicular a su dirección de propagación.

Tampoco podían explicar la doble refracción del espató de Islandia que se conocía desde hacía cien años. Cuando materiales de este tipo, llamados anisótropos, se colocan entre polarizadores se observan figuras que cambian de color al hacer girar los polarizadores en torno al eje que los une.

Para explicar este comportamiento necesitamos retomar un experimento que hicieron Fresnel y Arago en 1816. Descubrieron que dos rayos polarizados en direcciones perpendiculares entre sí no interfieren. Cuando Young tuvo noticia del experimento, le dio enseguida una interpretación: «Eso es debido a que las vibraciones luminosas son transversales». En efecto, cuando las vibraciones luminosas llegan a un punto al que han accedido por caminos muy próximos, si son ondas longitudinales, como las del sonido, interferirán siempre sumándose las amplitudes en la dirección de propagación. Si, por el contrario, son ondas transversales, vibran en un plano perpendicular a dicha dirección. Su suma tiene carácter vectorial y, al elevar al cuadrado la amplitud resultante de la suma para obtener la intensidad en la interferencia, en el término interferencial aparece el producto escalar de una amplitud por la otra. Si son perpendiculares entre sí, este producto es cero y no existen interferencias.

Sobre la transversalidad de las ondas luminosas hay un experimento sencillo que Albert Einstein y Leopold Infeld proponen en su libro *La Física, aventura del pensamiento* (Einstein e Infeld, 1939). En la actualidad se puede llevar a cabo con dos láminas polarizadoras de las que se usan en las gafas para protegerse de los rayos solares. Si se colocan las láminas una a continuación de la otra, paralelas entre sí, y se mira a su través se observa lo siguiente: cuando se gira una respecto de la otra alrededor de la dirección perpendicular a ellas, la luz aparece y desaparece al realizar el giro. Por el contrario, si lo que se hace es acercar o alejar paralelamente una lámina a la otra, la luz no cambia en absoluto. La conclusión que se puede sacar es que la luz es

una onda transversal, ya que sus propiedades son afectadas cuando se actúa en el plano perpendicular a su dirección de propagación y no cuando se actúa en esta dirección. Fresnel asimiló el significado total de esta hipótesis y dedujo de ella numerosas consecuencias, interpretando correctamente la polarización de la luz y todos los fenómenos luminosos conocidos en la época.

En el transcurso de estas investigaciones estudió cómo se distribuía la energía luminosa en la superficie de separación de dos medios isótropos y transparentes (figura 5), y obtuvo así las famosas ecuaciones que llevan su nombre.

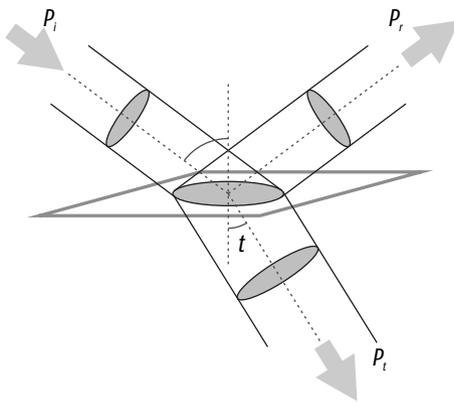


Figura 5. Reparto de la potencia luminosa en la superficie de separación de dos medios transparentes.

Cuando una onda luminosa llega a la superficie de separación de dos medios con una potencia P_i , parte de esta se refleja, P_r , y parte se transmite al otro medio, P_t :

$$P_i = P_r + P_t \tag{20}$$

Se pueden definir los factores de reflexión paralelo, $R_{||}$ para la polarización paralela al plano de incidencia, y perpendicular, R_{\perp} , para la polarización perpendicular a dicho plano, como los cocientes entre la potencia reflejada y la potencia incidente en dichos estados de polarización:

$$R = P_r / P_i \text{ y } R_{\perp} = P_{r,\perp} / P_i \tag{21}$$

De la misma manera se definen los factores de transmisión T . El principio de la conservación de la energía hace que la suma de los factores de reflexión y transmisión en cada estado de polarización sea igual a la unidad:

$$R + T = 1 \quad (22)$$

Fresnel obtuvo los factores de reflexión y transmisión a partir de las condiciones de continuidad de las amplitudes de las ondas a través de la superficie de separación de los medios, y demostró que dependen del ángulo de incidencia i , del ángulo de refracción t y del estado de polarización de las ondas luminosas. Es decir, dependen de los dos medios, porque la superficie de separación pertenece a ambos. Las fórmulas a las que llegó son las siguientes:

$$R_{\parallel} = \frac{\operatorname{tg}^2(i-t)}{\operatorname{tg}^2(i+t)}; R_{\perp} = \frac{\operatorname{sen}^2(i-t)}{\operatorname{sen}^2(i+t)} \quad (23)$$

En la figura 6 se puede ver la variación de los factores de reflexión para la superficie aire-agua. El factor de reflexión perpendicular R_{\perp} aumenta paulatinamente desde un valor de algunas centésimas para incidencia normal (ángulo cero con la normal a la superficie) hasta el valor de uno para incidencia rasante (paralelo a la superficie).

El factor de reflexión paralelo R_{\parallel} , primero disminuye hasta anularse para un ángulo que se denomina ángulo de Brewster y luego aumenta paulatinamente hasta valer uno para incidencia rasante. Este comportamiento lo explican perfectamente las ecuaciones de Fresnel, en las que interviene el índice de refracción del agua con respecto al aire. El ángulo para el que se anula R_{\parallel} corresponde al ángulo de incidencia i_B para el que su suma con el de refracción t_B es igual a 90° . Eso hace que el denominador de la expresión de R_{\parallel} tienda a infinito estando limitado el numerador. La luz reflejada para este ángulo está totalmente polarizada según la dirección perpendicular al plano de incidencia. Por esa razón se le denomina ángulo de polarización o de Brewster (por su descubridor, David Brewster).

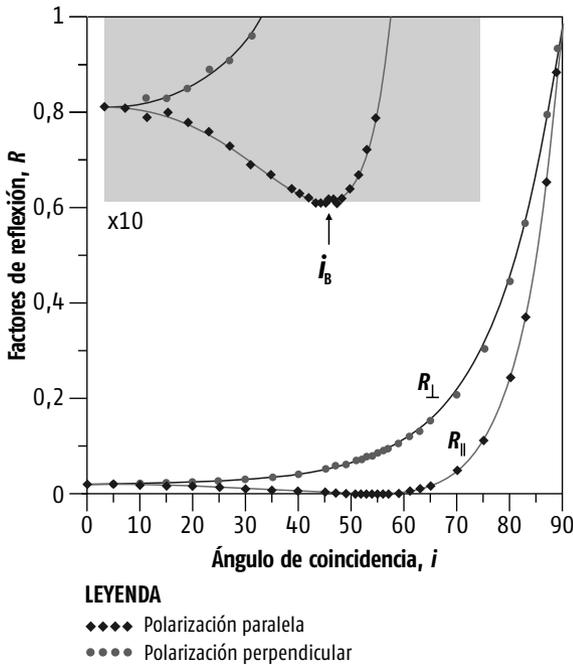


Figura 6. Factores de reflexión para la superficie agua-aire.

La luz transmitida también está parcialmente polarizada, hecho que se utiliza en los dispositivos láser para obtenerlos con el tipo de luz más sencillo: onda monocromática polarizada linealmente.

El medio láser se limita con dos ventanas de Brewster que hacen que cada vez que pasa la radiación por ellas se polaricen parcialmente (figura 7). Tras múltiples reflexiones en los espejos de la cavidad, el grado de polarización en la dirección paralela converge rápidamente hacia la unidad. Veamos este extremo más de cerca.

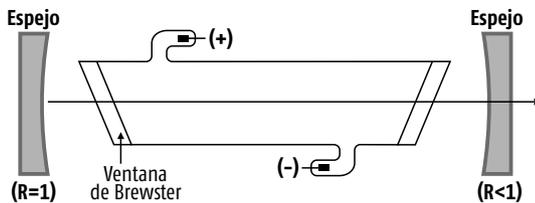


Figura 7. Cavidad láser con ventanas de Brewster.

En este caso, el grado de polarización se define como la diferencia entre los valores I (máximo) e I_{\perp} (mínimo) de las intensidades paralela y perpendicular dividido por su suma:

$$g_p = \frac{I - I_{\perp}}{I + I_{\perp}} \quad (24)$$

Cada vez que la luz láser atraviesa la ventana de Brewster la componente perpendicular de la intensidad se multiplica por el factor T_{\perp} , que es menor que la unidad. Por el contrario, la componente paralela no varía. Si al principio las dos componentes eran iguales, al cabo de N trayectos de ida y vuelta atravesando 4 veces la ventana de Brewster, su relación será:

$$g_p = \frac{1 - T_{\perp}^{4N}}{1 + T_{\perp}^{4N}} \quad (25)$$

Para un índice de refracción $n = 1,52$ (vidrio), al cabo de 10 trayectos el grado de polarización es $g_p = 0,998$. Si la longitud de la cavidad láser es de 25 cm, el tiempo que demoraría en alcanzar este grado de polarización sería de $3,33 \times 10^{-9}$ s.

En 1823 Fresnel completó y publicó su *Memoria sobre las leyes de las modificaciones que la reflexión impone a la luz polarizada*. En ella se incluyen estas fórmulas que se acaban de exponer sobre los factores de reflexión y refracción de la luz en la superficie de separación de dos medios transparentes e isótropos, que dan cuenta del reparto de la energía luminosa en dicha superficie (Sénarmont, Verdet y Fresnel, 1866).

2.3. La lente escalonada de Fresnel

Fresnel continuó trabajando como ingeniero e investigando las interferencias, la polarización y la naturaleza de la luz.

En 1819 fue nombrado miembro de la Comisión de Faros y en 1821 fue profesor de Física y de Geometría en l'École Polytechnique.

Desarrolló en 1822 una lente *escalonada*, que se conoce como lente de Fresnel (figura 8), cuyo diseño permite la construcción de lentes de una gran apertura y de una corta distancia focal, sin el peso y el volumen de material que debería usarse en una lente de diseño convencional.

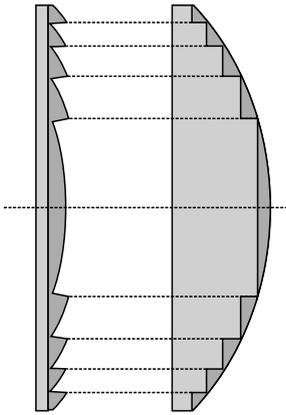


Figura 8. Lente escalonada de Fresnel.

El primer prototipo fue probado al año siguiente en el faro de Cordouan (figura 9). Este faro, equipado con una lente de mayor diámetro, pero mucho menos pesada, pasó de tener un alcance de 15 km a uno de 60 km, es decir, cuatro veces mayor. Fresnel publicó entonces su *Memoria sobre un nuevo sistema de iluminación de los faros*. Sus lentes siguen utilizándose hoy en día y tienen múltiples aplicaciones en óptica.



Figura 9. Faro de Cordouan en Le Verdon-sur-Mer, Gironde (Francia).

En 1823, fue nombrado secretario de la Comisión de Faros y Balizas y, poco después, elegido miembro de la Academia de Ciencias por unanimidad.

La Royal Society de Londres le otorgó la Medalla Rumford en 1824 y al año siguiente le nombró miembro correspondiente extranjero.

Finalmente le otorgaron el cargo de Director del Servicio francés de Faros en 1827, poco antes de su muerte, que acaeció el 14 de julio de 1827, durante la fiesta nacional de Francia que conmemora la toma de la Bastilla. Fresnel murió de tuberculosis cuando tenía solo 39 años y fue enterrado en el cementerio Père-Lachaise, al este de París. Su rica trayectoria científica solo duró doce años.

Desde entonces su figura no ha hecho más que engrandecerse y se le han tributado numerosos homenajes. Pero, sin duda, el más popular de ellos se encuentra en la Torre Eiffel. Fresnel es uno de los setenta y dos sabios cuyo nombre está grabado en el entrepaño, entre la base y el primer piso de la torre. Son científicos, ingenieros e industriales franceses que realizaron aportaciones relevantes en sus campos en el siglo XIX.

Bibliografía

- CARRERAS, C.; J. P. SÁNCHEZ-FERNÁNDEZ y M. YUSTE (2016): «La difracción de Fresnel: dos siglos de esplendor de las ondas luminosas», ponencia, VII Tiberio, La Habana, marzo.
- EINSTEIN, A. y L. INFELD (1939): *La Física, aventura del pensamiento*, Buenos Aires: Losada, S. A.
- GOODMAN, J. W. (2008): *Introducción a la Óptica de Fourier, Cuadernos de la UNED*, n.º 287, Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED). ISBN: 978-84-362-5561-4. Traducción de la segunda edición por C. Carreras Béjar y O. Calzadilla Amaya.
- PARKS, J. E. (1979): «If Dracula had a Laser», *Physics Teacher* «Awards» Series, mayo.
- SÉNARMONT, HENRY HUREAU DE; ÉMILE VERDET y LÉONOR FRANÇOIS FRESNEL (1866): *Œuvres complètes d'Augustin Fresnel: Théorie de la lumière*, Paris: Imprimerie Impériale, <https://books.google.fr/books/about/%C5%92uvres_compl%C3%A8tes_d_Augustin_Fresnel_Th.html?id=3QgAAAAAMAA&hl=es> [9/2/2016].
- YUSTE, M. y C. CARRERAS (1986): «Comment on “Simple Experiment Illustrating the Properties of Waves in a Refractive Medium”», *American Journal of Physics*, vol. 54, n.º 7, July, pp. 652-653.



Aplicación de la metrología en Colombia a través del Grupo de Investigación en Metrología Bio-Eléctrica (GIMBE) de la Universidad Tecnológica de Pereira

WILLIAM OLARTE,* E. Y. CASTRILLÓN,** M. A. LÓPEZ***

Introducción

Los tratados de comercio que han globalizado la economía han exigido que la producción sea de mayor calidad y requiera un control más estricto; es el campo de la metrología el que permite garantizar los requisitos de calidad del mercado. Esta ponencia desarrolla el tema de la metrología desde sus inicios, mostrando una breve historia de la disciplina, hasta su implementación y evolución en el eje cafetero colombiano.

Antes de la existencia del Sistema Métrico Decimal, los humanos usaban su propio cuerpo como referencia de medida. Así, aparecen el pie, el codo, la palma, la cuarta, el dedo y la pulgada como unidades métricas. El 21 de septiembre de 1792 quedó fijado el valor del metro y el 20 de mayo de 1875 se firmó la Convención del Metro, por medio de la cual se acordó el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Debido a la demanda de regulaciones en metrología, se creó un grupo de entidades, las cuales se muestran en la figura 1. Son entes acreditadores las siguientes: Cooperación Europea de Acreditación (EA), Cooperación Interamericana de Acreditación (Interamerican Accreditation Cooperation –IAAC), Cooperación de Acreditación de Laboratorios Asia-Pacífico (Asia Pacific Laboratory Accreditation Cooperation –APLAC) y Comunidad de Acreditación del Sur de África (Southern African Development Community Cooperation in Accreditation –SADCA); y encargadas de la organización de la metrología: Cooperación Euroasiática de Instituciones Nacionales de Metrología (Euro-Asian Cooperation of National Metrological Institutions –COOMET), Asociación Europea de Institutos Nacionales de Metrología

* Facultad de Ciencias Básicas, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.

(European Association of Metrology Institutes –EURAMET), Sistema Interamericano de Metrología (SIM), Programa de Metrología de Asia-Pacífico (Asia Pacific Metrology Programme –APMP) y Southern African Development Community Cooperation in Measurement Traceability (SADCMET).



Impacto de la OPM-MRA en la promoción del comercio y el desarrollo.
BIPM. Castelazo, Ismael. (2004).

Figura 1. Organizaciones metrologógicas en el mundo.

Fuente: Castelazo (2004).

A nivel nacional, en 1905 se aprobó en Colombia la Ley N.º 33, que dicta la obligación en el país de aplicar el sistema decimal francés. En 1980, mediante el Decreto N.º 3464, se hace obligatorio el uso del Sistema Internacional de Unidades y en 2011, por medio del Decreto 4175, se desprenden las funciones de metrología y normas técnicas de la Superintendencia de Industria y Comercio y se crea el Instituto Nacional de Metrología (INM).

La metrología en la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP), grupo de investigación GIMBE

Los laboratorios de la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP) nacen de la necesidad de suplir los servicios de calibración en el Eje Cafetero. En 1998 se aprobó un proyecto del Banco de Proyectos de Inversión Nacional (BPIN) que incluía un laboratorio de metrología para el Departamento de Física. En marzo de 2000 se obtuvo el respaldo económico de la universidad para la adecuación del laboratorio a través de un proyecto con el

Centro de Investigaciones y Extensión de la UTP. En 2003 la Superintendencia de Industria y Comercio (SIC) acredita el Laboratorio de Genética Médica, el primero en Colombia. En 2006 se acredita el Laboratorio de Variables Eléctricas, con resolución 929 de la SIC; en 2008, el Laboratorio de Metrología Dimensional, con la resolución de la SIC N.º 45789 del 13 de noviembre; en 2009, el Laboratorio en Metrología Electromédica, con resolución 25771; y en abril de 2011, el laboratorio de Ensayos a Equipos de Aire Acondicionado, bajo el código 10-LAB-029.

1. Normatividad aplicada en Colombia

1.1. Sector industrial

En la industria en general, las magnitudes más críticas y medidas con mayor frecuencia son las siete unidades de base del SI, a saber: masa, temperatura, longitud, tiempo, corriente eléctrica, intensidad luminosa y cantidad de sustancia.

La norma ISO 9001:2015, en el capítulo 7.1, apartado 7.1.5, explica: «Si la empresa usa la medición para demostrar que los productos y servicios cumplen con todos los requisitos, se tiene que asegurar que se proporcionan todos los recursos necesarios para asegurarse de que los resultados al realizar la medición y el control son válidos». Para cumplir con este requisito, las empresas envían a calibrar sus instrumentos de medición a laboratorios acreditados.

Hasta la fecha en Colombia se cuenta con un total de 158 laboratorios de calibración acreditados bajo la norma NTC-ISO 17025 por el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia (ONAC).

Algunos de los métodos de calibración empleados por los laboratorios acreditados de Colombia son:

- Guías de calibración EURAMET: CG-15 para multímetros digitales, CG-11 para simulación eléctrica de temperatura.
- Publicaciones del CEM: EL-001 para multímetros digitales, EL-004 para megohímetros, TH-007 para medidores de condiciones ambientales de temperatura y humedad, ME-017 para transductores de presión con salida eléctrica.
- Guía SIM MWG7/cg-01/v.00 para calibración de instrumentos de pesaje de funcionamiento no automático.
- NTC 3679 para calibración de taxímetros electrónicos.
- ISO 8655-6 para aparatos volumétricos.
- Guías técnicas del CENAM.

1.2. Sector médico

La normatividad colombiana, en el tema de calibración para equipos biomédicos, especifica que solamente requieren calibración en forma obligatoria los equipos biomédicos considerados instrumentos de medición cuya finalidad prevista es la de medir, pesar o contar, como objeto de control metrológico legal por parte de la Superintendencia de Industria y Comercio (SIC). El fabricante es quien conoce la finalidad prevista del equipo biomédico y es en el registro sanitario o permiso de comercialización donde esta se puede identificar.

El siguiente es un listado de equipos biomédicos considerados instrumentos de medición, extraído de la Resolución 2003 de 2014 (MISALUD, 2014); estos equipos biomédicos cuentan con laboratorio de calibración acreditado en el país:

- Básculas y balanzas
- Pesa para bebé
- Termómetro
- Manómetro para gases medicinales
- Tensiómetro
- Cinta métrica
- Pesa pañal
- Pipetas automáticas (no hay acreditación en sitio)
- Termohigrómetro (no hay acreditación en sitio)

Algunos de los métodos normalizados empleados por los laboratorios de calibración en Colombia son:

- Recomendaciones de la OIML: R-16, anexo A.1 para esfigmomanómetros; R-66 para longitud.
- Publicaciones ISO/IEC: para electrobisturías, desfibriladores, incubadoras neonatales, bombas de infusión y electrocardiógrafos.
- Procedimiento TH- 007 para la calibración de medidores de condiciones ambientales de temperatura y humedad en aire del Centro Español de Metrología.
- Directriz DKD-R 6-1: «Calibración de instrumentos medidores de presión».
- Procedimiento di-011 para la calibración de flexómetros del Centro Español de Metrología.

- ISO 8655-6: «Aparato volumétrico accionado por pistón. Parte 6. Métodos gravimétricos para la determinación de error de medida».

En la calibración de equipo biomédico que no tiene método normalizado se siguen las indicaciones de los fabricantes de los patrones y simuladores biomédicos.

1.3. Sector comercial

El Gobierno Nacional en el Decreto 1074 de 2015, en el artículo 2.2.1.7.7.3 «Instrumentos de medida sujetos a control metrológico», determina que son instrumentos de medida sujetos a control metrológico los que sirvan para medir, pesar o contar y que tengan como finalidad, entre otras, las siguientes:

- Realizar transacciones comerciales o determinar el precio de servicios.
- Remunerar o estimar labores comerciales.
- Prestar servicios públicos domiciliarios.
- Realizar actividades que puedan afectar la vida, la salud o la integridad física, la seguridad nacional o el medioambiente.
- Evaluar la conformidad de productos y de instalaciones.

La metrología legal en Colombia está regulada por la SIC, la cual establece en su «Circular única», título VI de Metrología:

Las normas contenidas en esta circular son aplicables a toda persona natural o jurídica que fabrique, importe y comercialice instrumentos de medición sujetos a control metrológico en el territorio nacional, a los responsables titulares o usuarios de tales instrumentos, a los organismos evaluadores de la conformidad, a los Organismos Autorizados de Verificación Metrológica –OAVM– y a los reparadores de instrumentos de medición que presten sus servicios en Colombia (SIC, 2001).

Asimismo, en el numeral 6.5, «Requisitos metrológicos», establece que los requisitos que deben satisfacer los instrumentos de pesaje son definidos en la Norma Técnica Colombiana NTC 2031:2014: «Instrumentos de pesaje de funcionamiento no automáticos.

Requisitos metroológicos y técnicos. Pruebas». En el numeral 3.1 aclara que «aquellos instrumentos de medición sujetos a control metroológico respecto de los cuales la SIC no haya expedido la reglamentación técnica metroológica, están sujetos al cumplimiento de la recomendación de la Organización Mundial de la Metrología Legal –OIML».

1.4. Laboratorios de calibración y entidades de control metroológico

El artículo 84 del Decreto 1471 de 2014 establece como políticas del ente acreditador lo siguiente: «Son proveedores de los servicios de calibración el Instituto Nacional de Metrología (INM) y los laboratorios de calibración legalmente constituidos y que demuestren su competencia técnica mediante un certificado de acreditación vigente con la norma NTC-ISO/IEC 17025, o la que la modifique, sustituya o adicione». En la figura 2 se muestra la relación entre las entidades metroológicas.

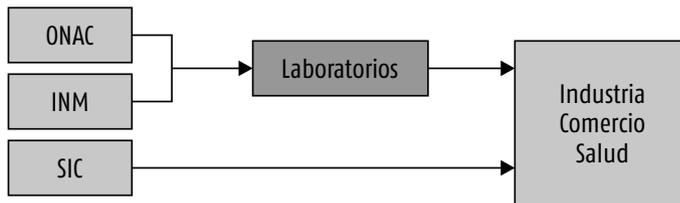


Figura 2. Esquema de relación de entidades metroológicas.

El Organismo Nacional de Acreditación de Colombia (ONAC) en el año 2010 adquirió su membresía en International Accreditation Forum (IAF) y en 2013 pasó de miembro asociado a miembro pleno de InterAmerican Accreditation Cooperation (IAAC). Igualmente, en ese año ONAC se convirtió en miembro asociado de International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC).

2. Experiencias

2.1. Sector industrial

Las empresas que están certificadas con normas de calidad como la ISO 9001 deben garantizar la confiabilidad de sus mediciones a través de la certificación emitida por un laboratorio acreditado. Se referencian algunas de las empresas a las cuales se les ha prestado servicio de calibración:

- Ingenio Risaralda
- Central Hidroeléctrica de Caldas CHEC
- ABB
- Nestlé-La Rosa

El laboratorio de Metrología de Variables Eléctricas de la Universidad Tecnológica de Pereira, cuenta con acreditación de las siguientes magnitudes:

- Corriente continua y alterna
- Tensión continua y alterna
- Resistencia
- Simulación eléctrica de temperatura
- Frecuencia

Algunos de los instrumentos de medición de variables eléctricas que se calibran son:

- Multímetros
- Pinzas amperimétricas
- Telurómetros
- Generadores de frecuencia
- Fuentes de poder
- Resistencias shunt
- Analizadores de redes

2.2. Sector salud

Por medio de la Resolución 2003 de 2014 se exige a las entidades prestadoras de servicios de salud tener debidamente calibrados los equipos biomédicos que sirvan para contar, medir o pesar o que tengan subsistemas de medición.

Desde el año 2006 la Universidad Tecnológica de Pereira, con su Laboratorio de Variables Electromédicas, comienza a prestar servicios de calibración a hospitales y entidades de salud.

Algunos de los equipos médicos que se calibraban en este tipo de instituciones incluían monitores de signos vitales, electrocardiógrafos, desfibriladores, electrobisturías, ventiladores pulmonares, incubadoras pediátricas, entre otros.

Las secretarías de salud departamentales iniciaron operativos de control revisando el estado de calibración de los equipos

médicos, por lo que los hospitales, las clínicas y los consultorios solicitaban el servicio a los pocos laboratorios que existían en la región. Algunas de las entidades donde el laboratorio de la UTP prestó el servicio fueron:

- En Risaralda:
 - ◆ Hospital Universitario San Jorge
 - ◆ Fundación clínica cardiovascular del niño de Risaralda
 - ◆ Liga contra el Cáncer
 - ◆ Clínica Comfamiliar
 - ◆ Hospital San Rafael
 - ◆ Centro de especialistas de Risaralda
 - ◆ Hospital San Pedro y San Pablo de la Virginia

- En Caldas:
 - ◆ ESE Hospital San Marcos de Chinchiná
 - ◆ Hospital San Vicente de Paul de Anserma
 - ◆ Hospital Santa Teresita de Pácora
 - ◆ Clínica Versalles Manizales
 - ◆ Clínica San Marcel de Manizales
 - ◆ Clínica Ángel Manizales

- En Quindío:
 - ◆ ESE Hospital Mental Filandia
 - ◆ IPS Especializada

- En Norte del Valle: Centro Diagnóstico Sico-sensométrico del Valle del Cauca S.A.S.

Aunque las secretarías de salud exigían la calibración de los equipos biomédicos, no exigían que el laboratorio prestador del servicio estuviera acreditado, por lo cual para el año 2014 se conformaron más laboratorios que brindaban el servicio de calibración, sin estar acreditados. Esto impactó económicamente en el sostenimiento de la acreditación del laboratorio de la UTP, por lo que se tomó la decisión de suspender la prestación de ese servicio.

2.3. Sector comercial

La «Circular única» de la SIC, en el título VI, reglamenta que los tenedores de instrumentos de pesaje no automático empleados en transacciones comerciales deben ser verificados metrologicalmente de manera periódica de acuerdo con la NTC 2031 (SIC, 2001).

Para esto, mediante a Resolución 37514 del 15 de junio de 2016, la SIC designó al Consorcio de Verificación Metrological SGS-CLM como OAVM (organismo autorizado de verificación metrological) de instrumentos de pesaje de funcionamiento no automático (balanzas) que sean utilizados en transacciones comerciales y se encuentren en servicio en grandes superficies, supermercados de cadena y establecimientos de comercio de autoservicio que posean dos o más de estos instrumentos; y también como organismo verificador de surtidores de combustibles líquidos en estaciones de servicio.

El Grupo de Investigación en Metrological Biomédica GIMBE apoya a diferentes empresas prestando el servicio de asesoramiento en metrological para dar cumplimiento al requisito de la SIC.

Algunas de estas empresas son:

- Jerónimo Martins Colombia
- TERPEL
- FRUVAL
- Supermercados MAZIVO

3. Influencia de la metrological en la calidad de procesos productivos y de servicios

- Implementación de procesos de medición en busca del control en procesos de fabricación.
- Metrological para el diseño y desarrollo de un producto.
- Control de la calidad de un producto terminado a partir de procesos de medición (figura 3).
- Cumplimiento de normas nacionales e internacionales.
- Garantía de transparencia en transacciones comerciales a través de procesos de medición
- Mediciones para el desarrollo científico y tecnológico.



Figura 3. Medición para el control de la calidad.

Conclusiones

En Colombia, la implementación de la metrología ha permitido que el país pueda tener una participación activa en los tratados de libre comercio, de modo que exista un intercambio comercial que fortalezca la economía y la industria colombianas.

La creación de organismos de control y verificación metrológica en el país permitieron fortalecer la calidad de las mediciones, los procesos de manufactura y la prestación de servicios en los que se ven involucradas mediciones. Gracias a esto Colombia crea la red nacional de metrología y es aceptada por otros países en los tratados de comercio, de modo que ha venido superando las dificultades técnicas y tecnológicas en la calidad y el aseguramiento de las mediciones.

Bibliografía

- CATELAZO, ISMAEL (2004): «Impacto del CIPM-MRA en la promoción del comercio y el desarrollo», Buró Internacional de Pesos y Medidas (BIPM).
- JOINT COMMITTEE ON GUIDES FOR METROLOGY (JCGM) (2008): «International Vocabulary of Metrology. Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM) JCGM 200:2008», Sèvres, 3rd edition.
- MINISTERIO DE SALUD Y PROTECCIÓN SOCIAL (MINSALUD) (2014): Resolución 2003 de 2014: «Por la cual se definen los procedimientos y condiciones de inscripción de los prestadores de servicios de salud y de habilitación de servicios de salud», Bogotá.

MINISTERIO DE SALUD Y PROTECCIÓN SOCIAL (MINSALUD) (s. f.): «ABECÉ Mediciones en equipos biomédicos», Bogotá.

SUPERINTENDENCIA DE INDUSTRIA Y COMERCIO (2001): «Circular única», *Diario Oficial*, n.º 44511, Bogotá, 6 de agosto.



El punto brillante de Denis Poisson, un apoyo inesperado a la difracción de Fresnel

JUAN PEDRO SÁNCHEZ-FERNÁNDEZ,* CARMEN CARRERAS,*
MANUEL YUSTE*

Introducción

En 1818, hace dos siglos, Pierre-Simon Laplace y Jean-Baptiste Biot propusieron la difracción de la luz como tema para el Premio de la Academia de Ciencias de París. Su propuesta estaba motivada por la esperanza de que se encontrase una explicación del fenómeno luminoso desde el punto de vista de la teoría corpuscular de la luz de Newton, que era la predominante en aquella época. Sin embargo, el premio fue otorgado a Augustin Jean Fresnel, quien explicó el fenómeno desde un punto de vista ondulatorio, basándose en el principio de propagación de las ondas luminosas de Huygens y en el principio de interferencias de Young.

En la resolución del Premio tuvo una importancia capital la realización de un experimento sencillo, a la vez que sorprendente, que propuso Poisson, miembro del jurado y partidario de la teoría corpuscular de la luz. Poisson dedujo que, de ser correcta la teoría de Fresnel, en el centro de la sombra de un disco opaco debería aparecer un punto brillante (que se conocería después como «punto de Poisson»). Para comprobarlo, François Arago, mentor de Fresnel, realizó el experimento y todos pudieron comprobar que, en efecto, el punto luminoso existía. Como consecuencia del resultado del experimento, Fresnel recibió el premio y se inició el predominio de la teoría ondulatoria de la luz, que se prolongaría durante todo el siglo XIX.

* Departamento de Física Interdisciplinar, Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), Madrid, España.

Cuando en un laboratorio actual de óptica se reproduce el experimento de Poisson con ayuda de un láser, se puede constatar con relativa facilidad la existencia de un punto luminoso en el centro del patrón de difracción de un disco circular opaco. Pero si en lugar de un disco opaco se observa la figura de difracción de un agujero circular, también se constata otro hecho que produce un asombro similar al de aquel: en el centro del patrón de difracción la luz desaparece a determinadas distancias de observación, concretamente a distancias no muy grandes desde el agujero difractante.

Tras la realización de estos experimentos en el laboratorio docente de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), se ha llevado a cabo el análisis de las expresiones matemáticas derivadas de la teoría de la difracción en aproximación de Fresnel (o de campo próximo) para justificar los hechos observados: la existencia de luz en el punto de Poisson a cualquier distancia de observación (no se extingue a ninguna distancia) en el caso del disco opaco y la ausencia de luz a determinadas distancias en el centro del patrón de difracción del agujero. Los detalles del análisis del problema y su interpretación física se presentan a continuación.

1. Montaje y resultados experimentales

Para reproducir el experimento histórico de Poisson se ha utilizado un láser de He-Ne, un expandidor de haz, espejos, una pantalla opaca, una cámara fotográfica, una cámara CCD, soportes diversos y las dos pantallas difractantes objeto de estudio: un disco metálico adherido a un portaobjetos de vidrio de microscopio y un agujero circular practicado en una lámina opaca de fibra de vidrio. El experimento consiste en la observación de la figura de difracción producida por el disco opaco y por el agujero circular cuando son iluminados con el haz láser expandido (figura 1); ambos patrones pueden ser analizados de manera visual al proyectarlos sobre la pantalla opaca, o también pueden ser fotografiados o capturados directamente con la cámara CCD para su posterior análisis con el *software* oportuno (ImageJ o similar).

En la figura 2 se muestra esquemáticamente la distribución de los diferentes elementos ópticos en el montaje experimental llevado a cabo.

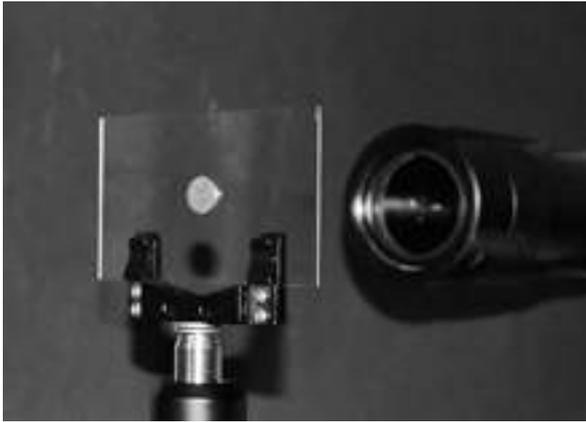


Figura 1. Detalle de uno de los objetos difractantes analizados, un disco circular opaco, mientras es iluminado con un haz láser expandido.

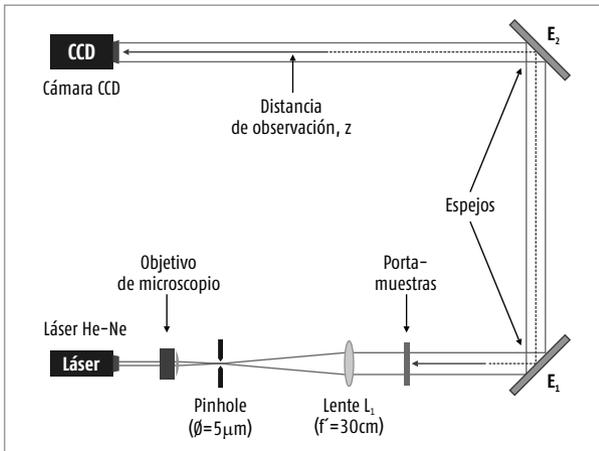


Figura 2. Esquema del montaje experimental empleado para el análisis de los patrones de difracción de Fresnel.

La figura 3 muestra una captura del patrón de difracción producido por la abertura circular utilizada en el experimento, de 2 mm de diámetro (superpuesto al patrón de difracción del agujero, de simetría circular, también se observa un patrón interferencial de franjas plano-paralelas, producidas por elementos ópticos ajenos al agujero; estas franjas pueden ser eliminadas con relativa facilidad procesando las imágenes o, sencillamente, pueden ser obviadas, pues no afectan al objetivo principal de este trabajo).

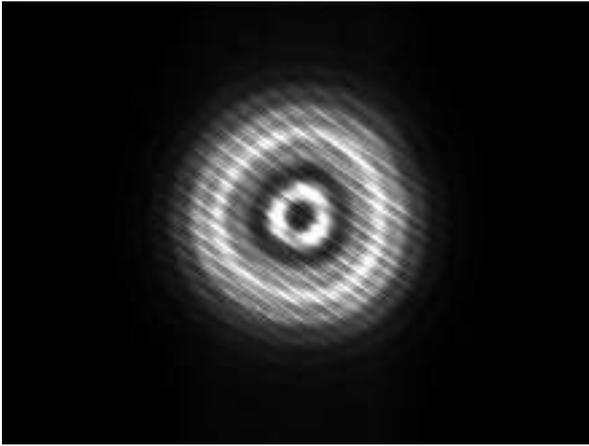


Figura 3. Figura de difracción producida por un agujero circular. La imagen ha sido capturada con una cámara CCD.

En la figura 4 puede verse la evolución del patrón de difracción del agujero circular al cambiar la distancia de observación z . Como puede apreciarse en las diferentes capturas, la intensidad de luz en el punto central varía con la distancia z , pudiendo oscilar su valor entre cero y un determinado valor máximo. Mediante el procesamiento de estas imágenes se han obtenido los correspondientes perfiles de intensidad de luz a lo largo de un diámetro, que permiten caracterizar gráfica y cuantitativamente la evolución de toda la curva (no solo la del punto central).

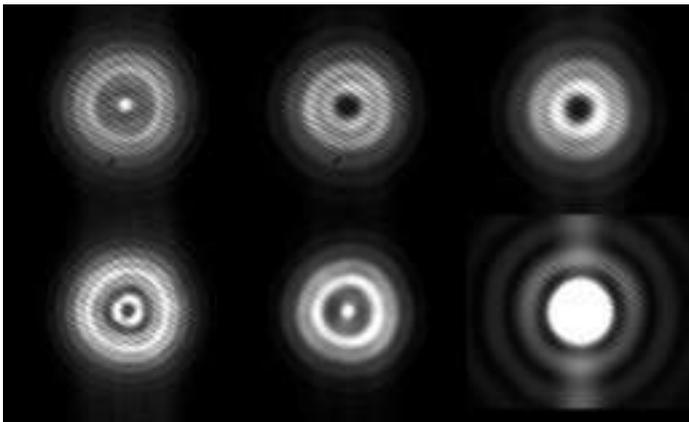


Figura 4. Secuencia de capturas del patrón de difracción de un agujero circular tomadas a distintas distancias de observación.

La figura 5 muestra una fotografía del patrón de difracción observado en el caso del disco opaco. En la imagen puede apreciarse la, *a priori* sorprendente, existencia de luz en el punto central de este, justo en el centro geométrico de la sombra del disco. En el experimento realizado no se ha detectado la extinción total del punto al variar la distancia de observación z , como sí ocurre en el caso del agujero.

Las observaciones descritas en los párrafos precedentes, pese a que pudieran parecer poco intuitivas, pueden inferirse a partir del modelo teórico habitualmente utilizado para la difracción de la luz en campo próximo, también conocido como «aproximación de Fresnel». Los detalles de este modelo se presentan en el siguiente apartado.

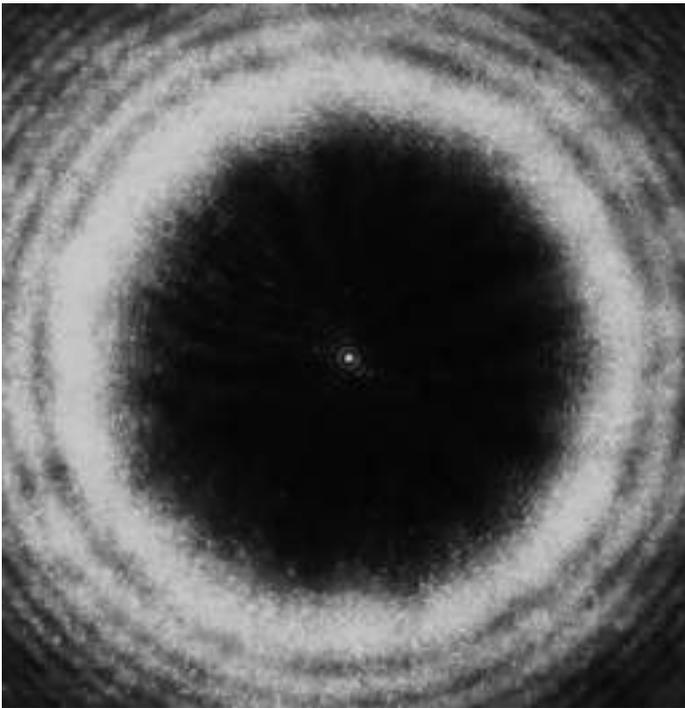


Figura 5. Fotografía del patrón de difracción producido por un disco circular opaco.

2. Modelo matemático: difracción de Fresnel

Dada una abertura genérica S practicada en una pantalla opaca, se pretende determinar la expresión del campo de difracción producido por la abertura a una distancia z de esta. En la figura 6 puede verse la

geometría y notación que suele utilizarse en el estudio del fenómeno. La abertura difractante está contenida en el plano $\{x, h\}$ y está iluminada en la dirección positiva del eje z .

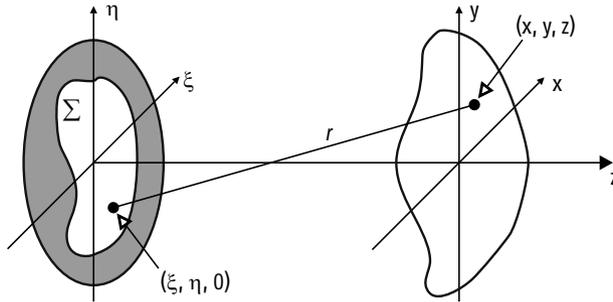


Figura 6. Geometría para el estudio de la difracción.

El campo en el plano $\{x, y\}$, paralelo al plano $\{\xi, \eta\}$ y a una distancia z de él, puede expresarse de la siguiente manera:

$$U(x, y) = \frac{1}{i\lambda} \iint_{\Sigma} U(\xi, \eta) \frac{e^{ikr}}{r} d\xi d\eta \quad (1)$$

donde la distancia r es:

$$r = \sqrt{z^2 + (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}$$

Para reducir el principio de Huygens-Fresnel a una expresión más simple y utilizable, se puede desarrollar en serie de Taylor la expresión de r . Para ello, sacando factor común z , la distancia r se puede escribir como:

$$r = z \sqrt{1 + \left(\frac{x - \xi}{z}\right)^2 + \left(\frac{y - \eta}{z}\right)^2}$$

Llevando a cabo el desarrollo de Taylor, considerando solamente los dos primeros términos, se obtiene:

$$r \approx z \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{x - \xi}{z}\right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{y - \eta}{z}\right)^2 \right]$$

Esta aproximación de segundo orden debe ser considerada en el término de fase de la expresión del campo (factor exponencial), pero, en dependencia de las condiciones del experimento y precisión buscada, puede no ser necesaria para el término de amplitud (denominador de dicha expresión). Concretamente, para pantallas difractantes consistentes en aberturas de pequeño tamaño en comparación con la distancia de observación, basta aproximar r por z (aproximación de primer orden) en el término de amplitud, quedando la expresión del campo como:

$$U(x, y) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} \iint_{\Sigma} U(\xi, \eta) \exp\left\{i \frac{k}{2z} [(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2]\right\} d\xi d\eta \quad (2)$$

2.1. Difracción por un agujero circular

Para una abertura circular (de diámetro $2L$) es más sencillo expresar la ecuación (2) en términos de las coordenadas polares: (ρ, ϕ) en el plano de la abertura y (R, θ) en el plano de observación; es decir:

$$\text{Plano de la abertura } \begin{cases} \xi = \rho \cos \phi \\ \eta = \rho \sin \phi \end{cases} \Rightarrow \rho = \sqrt{\xi^2 + \eta^2}$$

$$\text{Plano de la abertura } \begin{cases} x = R \cos \theta \\ y = R \sin \theta \end{cases} \Rightarrow R = \sqrt{x^2 + y^2}$$

El elemento de área $dx dy$ pasa a ser $\rho d\rho d\phi$.

Si se expresa en coordenadas polares la distancia r entre un punto del plano de la abertura y otro del plano de observación:

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{z^2 + (R \cos \theta - \rho \cos \phi)^2 + (R \sin \theta - \rho \sin \phi)^2} \\ &= z \sqrt{1 + \frac{R^2 + \rho^2}{z^2} - \frac{2R\rho \cos(\theta - \phi)}{z^2}} \end{aligned}$$

Desarrollando en serie de Taylor y quedándose solo con los dos primeros términos:

$$r \approx z \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{R^2 + \rho^2}{z^2} - \frac{2R\rho \cos(\theta - \phi)}{z^2} \right) \right] \quad (3)$$

Sustituyendo en el término de fase de la expresión (1), quedándose en la aproximación de primer orden $r \approx z$ para el factor de amplitud:

$$U(R, \theta) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} \iint_{\Sigma} U(\rho, \phi) e^{ik \frac{(R^2 + \rho^2)}{2z}} e^{-ik \frac{R\rho \cos(\theta - \phi)}{z}} \rho d\rho d\phi$$

Teniendo en cuenta que:

$$U(\rho, \phi) = \begin{cases} 1 & \text{para } \rho < L \\ 0 & \text{en el resto} \end{cases}$$

se llega a:

$$U(R, \theta) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} e^{ik \frac{R^2}{2z}} \int_0^L \int_0^{2\pi} e^{ik \frac{\rho^2}{2z}} e^{-ik \frac{R\rho \cos(\theta - \phi)}{z}} \rho d\rho d\phi$$

Y, finalmente, si se tiene en cuenta la expresión de la función de Bessel de primera especie y orden cero:

$$J_0(a) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{-ia \cos(\theta - \phi)} d\phi$$

entonces:

$$U(R, \theta) = 2\pi \frac{e^{ikz}}{iz} e^{ik \frac{R^2}{2z}} \int_0^L e^{ik \frac{\rho^2}{2z}} J_0\left(\frac{kR\rho}{z}\right) \rho d\rho$$

Realizando el cambio de variable:

$$\frac{kR\rho}{z} = \varepsilon \Rightarrow d\rho = \frac{z}{kR} d\varepsilon$$

la expresión anterior queda como:

$$U(R, \theta) = 2\pi \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} e^{ik \frac{R^2}{2z}} \left(\frac{z}{kR}\right)^2 \int_0^E e^{i b \varepsilon^2} J_0(\varepsilon) \varepsilon d\varepsilon$$

donde se ha definido:

$$E = \frac{kRL}{z}; \quad b = \frac{z}{2kR^2}$$

Llamando B a la integral anterior, esto es:

$$B = \int_0^E e^{ib\varepsilon^2} J_0(\varepsilon) \varepsilon d\varepsilon$$

entonces la expresión de $U(R, \theta)$ se puede escribir como:

$$U(R, \theta) = 2\pi \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} e^{ik\frac{R^2}{2z}} \left(\frac{z}{kR}\right)^2 B$$

Para estudiar B se puede descomponer la exponencial que aparece en el integrando como:

$$e^{ib\varepsilon^2} = \cos(b\varepsilon^2) + i \operatorname{sen}(b\varepsilon^2)$$

De esta manera, $B = B_1 + iB_2$, donde:

$$B_1 = \int_0^E \cos(b\varepsilon^2) J_0(\varepsilon) \varepsilon d\varepsilon$$

$$B_2 = \int_0^E \operatorname{sen}(b\varepsilon^2) J_0(\varepsilon) \varepsilon d\varepsilon$$

Consecuentemente, la intensidad vendrá dada por:

$$I(R, \theta) \propto |U(R, \theta)|^2 = \frac{\lambda^2 z^2}{4\pi^2 R^4} (B_1^2 + B_2^2) \tag{4}$$

Para obtener una expresión válida para la intensidad de luz en el punto central de la figura de difracción, basta hacer nula la coordenada polar R en el desarrollo en serie anterior para r –ecuación (3)–, introducirlo en el término de fase del campo y resolver analíticamente la integral para el cálculo del campo total (integral inmediata), con lo que se llega al final a la expresión:

$$I(R = 0) \propto |U(R = 0)|^2 = 4 \left[\sin\left(\frac{\pi L^2}{4\lambda z}\right) \right]^2 \tag{5}$$

2.2. Difracción por un disco circular opaco: intensidad en el punto central

Como se ha comentado más arriba, para pantallas difractantes consistentes en pequeñas aberturas basta con aproximar r por z en el término de amplitud de la expresión (1) del campo de difracción. Sin embargo, cuando se trata de objetos opacos en lugar de aberturas, los elementos infinitesimales emisores de luz desde el plano del objeto son los que constituyen toda la superficie complementaria al propio objeto difractante. En consecuencia, las distancias desde cada elemento emisor a un mismo punto de la pantalla de observación pueden ser bastante diferentes, por lo que conviene tomar al menos una aproximación de segundo orden para r en el término de amplitud del campo difractado. Haciendo uso de esta aproximación, y restringiéndonos al punto central de la figura de difracción de un disco opaco (de diámetro $2L$), vamos a deducir una expresión para la intensidad de luz en dicho punto que nos permita analizar el problema.

Si hacemos nula la coordenada polar R en el desarrollo en serie de Taylor para r , se tiene:

$$R = 0 \Rightarrow r \approx z \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\rho^2}{z^2} \right) \right]$$

Introduciendo esta expresión en la ecuación del campo difractado, tanto en el término de fase como en el término de amplitud, se tiene:

$$U(R=0) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda} \int_L^\infty \int_0^{2\pi} \frac{e^{ik\frac{\rho^2}{2z}}}{\frac{\rho^2}{z + \frac{\rho^2}{2z}}} \rho d\rho d\phi = 2\pi \frac{e^{ikz}}{i\lambda} \int_L^\infty \frac{e^{ik\frac{\rho^2}{2z}}}{z + \frac{\rho^2}{2z}} \rho d\rho$$

Nótese que, por tratarse de un disco opaco, la integración para la coordenada ρ ahora se extiende desde el radio L del disco hasta el infinito (en lugar de hacerlo desde 0 hasta L).

Realizando el cambio de variable:

$$\frac{k\rho^2}{2z} = u \Rightarrow \rho d\rho = \frac{z}{k} du$$

la expresión anterior queda como:

$$U(R=0) = 2\pi z \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} \int_{u_L}^{\infty} \frac{e^{iu}}{z + \frac{u}{k}} du = \frac{kze^{ikz}}{i} \int_{u_L}^{\infty} \frac{e^{iu}}{kz + u} du$$

donde el límite inferior de integración u_L viene dado por:

$$u_L = \frac{kL^2}{2z}$$

Si expresamos ahora la exponencial compleja del integrando en forma trigonométrica, resulta:

$$U(R=0) = \frac{kze^{ikz}}{i} \int_{u_L}^{\infty} \frac{\cos u + i \operatorname{sen} u}{kz + u} du = \frac{kze^{ikz}}{i} [C_1 + iC_2]$$

donde se ha llamado C_1 y C_2 , respectivamente, a las integrales:

$$C_1 = \int_{u_L}^{\infty} \frac{\cos u}{kz + u} du$$

$$C_2 = \int_{u_L}^{\infty} \frac{\operatorname{sen} u}{kz + u} du$$

Podemos entonces concluir que la intensidad en el punto central del patrón de difracción puede aproximarse por:

$$I(R=0) \propto |U(R=0)|^2 = k^2 z^2 (C_1^2 + C_2^2) \tag{6}$$

3. Análisis de los resultados

El hecho de que la intensidad en el centro del patrón de un agujero pueda ser nula a determinadas distancias puede llegar a sorprender en cierto modo. Y quizá sorprende aún más el caso de la difracción del disco opaco por la aparición del punto luminoso de Poisson. Pero en ambos casos es posible encontrar una justificación de los hechos observados en las expresiones obtenidas con el modelo matemático descrito en el apartado anterior.

3.1. Agujero circular

En el caso del agujero circular, la intensidad de luz en el punto central del patrón de difracción obedece a la ecuación (5). Si se representa

gráficamente dicha expresión en función de la distancia de observación z se obtiene la curva mostrada en la figura 7.

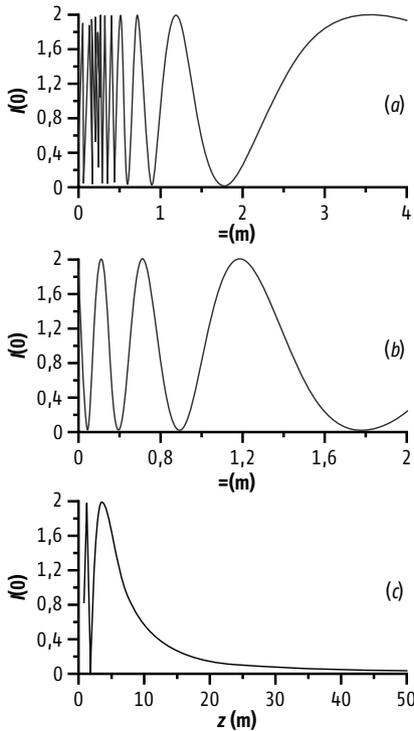


Figura 7. Representación gráfica de $I(R=0)$ en función de z para valores de z comprendidos entre: (a) 0 m y 4 m; (b) 40 cm y 2 m; (c) 40 cm y 50 m.

A partir de los gráficos puede hacerse la distinción de tres regiones con comportamientos diferentes (aunque sin transiciones abruptas entre ellas). A distancias de observación intermedias, ni muy cortas ni muy largas, la intensidad de luz del punto central pasa por una serie de máximos y mínimos sucesivos, siendo nulos estos últimos; la separación entre estos valores extremos crece con la distancia z (el período de la curva en este tramo es proporcional a z). A partir de una determinada distancia, en que se produce el último de los máximos, la intensidad de luz del punto central ya no vuelve a anularse; en lugar de ello, la intensidad tiende a disminuir asintóticamente hasta anularse en el infinito. Por último, a distancias z muy cortas, los máximos

y mínimos pasan a repetirse cada vez con mayor frecuencia, hasta parecer indistinguibles.

Ahora bien, la aproximación llevada a cabo para la deducción de la expresión (5), consistente en hacer r aproximadamente igual a z en el denominador de la amplitud de los campos emitidos por los elementos infinitesimales de la abertura, carece de validez para distancias z muy cortas (pues las distancias de cada elemento infinitesimal al centro del patrón de difracción pueden ser muy diferentes). Por lo tanto, las predicciones de la ecuación (5) son válidas siempre que la distancia de observación z no sea muy pequeña. Estas predicciones han sido verificadas de manera experimental con series de capturas de imágenes similares a las de la figura 4 y la extracción de sus correspondientes perfiles de intensidad a lo largo de un diámetro (ver ejemplos de la figura 8), perfiles que se corresponden con los que proporciona la expresión (4), como ha podido comprobarse resolviendo esa ecuación por métodos numéricos.

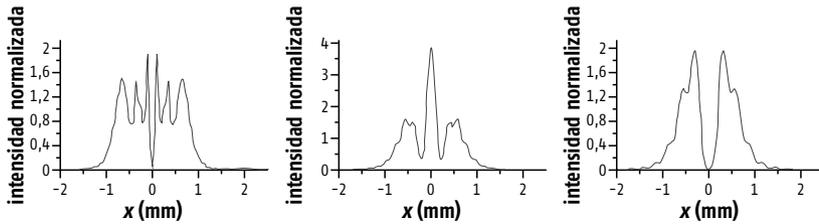


Figura 8. Distribución de intensidad producida por un agujero de diámetro $2L = 2$ mm a diferentes distancias z : (arriba) $z = 26$ cm; (centro) $z = 55$ cm; (abajo) $z = 80$ cm.

3.2. Disco circular opaco

En cuanto al patrón de difracción del disco opaco, se pudo detectar sin dificultad la existencia de luz difractada en su punto central. Es posible justificarla con facilidad mediante un análisis cualitativo de la expresión del campo de difracción, de manera similar a como se ha hecho en el caso del agujero.

Según la ecuación (6) deducida con anterioridad, la intensidad en el punto central de la figura de difracción de un disco opaco resulta aproximadamente proporcional a la suma de los cuadrados de las dos integrales definidas C_1 y C_2 . En este punto, cabe preguntarse si esta intensidad es nula o no (lo que implicaría la existencia de sombra o de luz, respectivamente, en el centro del patrón de difracción). Pues

bien, si se analizan las integrales en cuestión se puede intuir que el resultado de la intensidad no puede ser nulo, con independencia de cuál sea la distancia de observación z elegida.

En los integrandos de C_1 y C_2 se tienen las funciones trigonométricas coseno y seno de u , respectivamente, multiplicadas por la función hiperbólica $1 / (kz + u)$, donde kz , una vez elegida la distancia de observación, es una constante. En ambos casos, el resultado del producto de estas funciones da lugar a dos curvas que oscilan en torno al eje X , presentando máximos y mínimos cuya amplitud va decayendo asintóticamente hacia dicho eje. En el caso de C_1 , la curva comienza con un máximo en $u = 0$ y sus ceros se tienen para $u = (2m + 1) \pi / 2$, con m entero. Para C_2 , la curva comienza en el origen de coordenadas (es un cero de la función) y sus ceros se tienen para $u = mp$, con m entero.

En la figura 9 se puede ver el aspecto cualitativo de estas dos curvas.

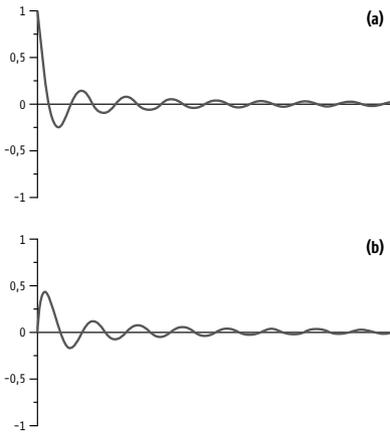


Figura 9. Curvas correspondientes a las funciones de los integrandos de C_1 (caso a) y C_2 (caso b).

En ambas funciones, cuanto mayor es el valor del producto kz más atenuados quedan sus máximos y mínimos; así, por ejemplo, con radiación visible ($\lambda \sim 500$ nm) y a una distancia de observación de 1 m, el valor de kz es del orden de 10^7 y los primeros máximos de las curvas tienen una amplitud del orden de 10^{-7} .

Por otro lado, las dos curvas recuerdan bastante al tramo final de la rama derecha (eje positivo de las x) de la función $\text{sinc } x = \text{sen } x / x$. Una

de las propiedades de la función sinc, que se refiere al área bajo su curva, establece que:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\text{sen } x}{x} dx = \pi$$

Esto quiere decir que el área bajo la curva converge hacia un valor concreto y no nulo (pese a que la curva está definida desde $-\infty$ hasta $+\infty$). En consecuencia, el área bajo cualquier tramo de esta curva estará siempre acotada (será de signo positivo o negativo, en dependencia del tramo elegido, pero siempre acotada). Por ejemplo, podemos evaluar numéricamente:

$$\int_0^{\pi} \frac{\text{sen } x}{x} dx \approx 1,8519$$

$$\int_{\pi}^{\infty} \frac{\text{sen } x}{x} dx = \int_0^{\infty} \frac{\text{sen } x}{x} dx - \int_0^{\pi} \frac{\text{sen } x}{x} dx \approx$$

$$\approx \frac{\pi}{2} - 1,8519 = -0,2811$$

En el caso de las funciones de los integrandos de C_1 y C_2 , por analogía con la función sinc podemos intuir que también van a poseer áreas acotadas bajo cualquier tramo de sus curvas (debido al hecho de presentar máximos y mínimos que se atenúan tendiendo asintóticamente hacia el eje X). Por lo tanto, es de esperar que los resultados de las integrales C_1 y C_2 sean finitos (positivos, negativos o incluso nulos, pero finitos); el resultado de cada una de ellas dependerá del valor concreto del límite inferior de integración (que depende del radio del disco opaco y de la distancia de observación). Y, puesto que en la expresión (6) de la intensidad del punto central los resultados de estas integraciones aparecen elevados al cuadrado, su signo resulta irrelevante. Para poder afirmar que en dicho punto habrá siempre luz, todavía cabe preguntarse si podría darse el caso en que las dos integrales resultasen nulas de manera simultánea para algún valor concreto de L . Pero el desfase relativo que presentan los máximos y mínimos de las curvas en cuestión induce a pensar que esta posibilidad no

puede darse (si para un valor concreto de L el área bajo una de las curvas resultase exactamente nula, el desplazamiento horizontal o desfase que presenta la otra curva respecto a aquella hará que el resultado de su integración sea diferente, esto es, no nulo). La argumentación llevada a cabo sobre estas líneas es de mismo modo válida para cualquier distancia de observación z que se elija, por lo tanto, podemos considerar justificada la afirmación de que en el punto central de la figura de difracción de un disco opaco habrá siempre luz, como ha podido constatarse experimentalmente en el laboratorio.

4. Interpretación física

Al buscar una interpretación física a todo el análisis anterior, debe tenerse en cuenta que para determinar el campo de difracción de cualquier objeto hay que sumar las ondas elementales que proceden de cada elemento emisor infinitesimal del plano de la pantalla difractante (principio de Huygens-Fresnel). En el caso de los objetos estudiados, por tener simetría circular, se eligen elementos infinitesimales con forma de sector de corona circular y área $dS = \rho d\rho d\phi$. Para el campo de difracción en el punto central (eje óptico) los campos elementales de todos los emisores situados en una misma circunferencia ($\rho = \text{cte}$) o corona infinitesimal de radio interno ρ y externo $\rho + d\rho$ llegan con la misma fase, por lo que se produce una interferencia constructiva y se suman sus amplitudes (e intensidades). Para otra circunferencia de radio $\rho' > \rho$ ocurrirá lo mismo, pero el campo total procedente de ella presentará un cierto desfase respecto al anterior, desfase que dependerá de la distancia z . Entonces, según sea el valor de z , la interferencia entre ambos puede ser constructiva o no, y puede incluso producirse la extinción mutua, en dependencia ahora de sus amplitudes.

En el caso concreto de un agujero circular, la expresión (5) se ha obtenido sumando ondas elementales de igual amplitud (para el factor de amplitud se ha supuesto que todos los elementos están aproximadamente a la misma distancia z del punto de observación), pero con distinta fase (para el término de fase sí se han considerado sus diferentes distancias). Pues bien, para una distancia de observación dada, al realizar la integración desde $\rho = 0$ hasta $\rho = L$ se van a ir sumando las contribuciones de diferentes circunferencias (o anillos) al campo total y el resultado final dependerá del valor de

L ; se puede tener para determinados valores de L la extinción completa de dicho campo en el punto central del patrón de difracción. Esto es posible confirmarlo si se observa la representación gráfica de la intensidad de luz de la expresión (5) frente al radio L (figura 10). Por el mismo motivo, fijado el radio L del agujero, pueden darse determinadas distancias z para las cuales los desfases entre las contribuciones elementales al campo total en el punto central provoquen la extinción de este, como se mostraba en la figura 7.

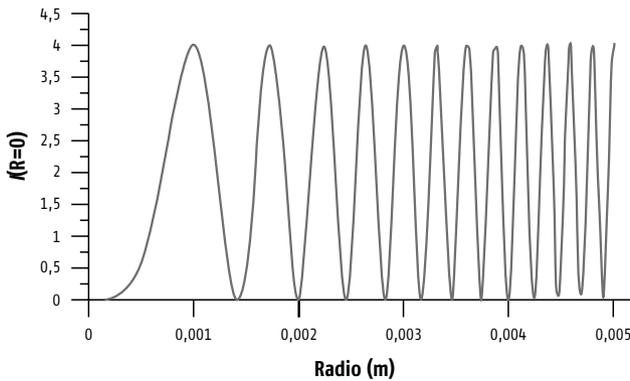


Figura 10. Representación gráfica de $I(R=0)$ en función del radio L del agujero circular, para una distancia de observación $z = 1$ m.

Cuando las distancias de observación z son muy grandes en comparación con el tamaño del agujero, entonces todas las contribuciones elementales al campo total llegan al punto central con igual amplitud e incluso prácticamente con la misma fase, luego la interferencia será siempre constructiva; la intensidad de luz en dicho punto disminuirá entonces con la distancia de observación, pero siempre presentará un máximo, nunca un cero, lo que explica el último tramo de la curva representada en la figura 7.

Para el caso del disco opaco, cualquiera que sea su tamaño, siempre habrá elementos emisores a distancias del punto de observación muy diversas, pues estos se extienden hasta el infinito. En consecuencia, las ondas que se suman en la integración que conduce a la expresión (6) se consideran de diferente amplitud, tanto menor cuanto mayor sea la distancia recorrida hasta el punto de observación. Al realizar entonces la integración desde $\rho = L$ hasta el infinito se van a ir sumando las contribuciones de los diferentes anillos al campo total, pero la

disminución de la amplitud de las ondas con la inversa de la distancia supone un factor de peso crucial que impide que pueda llegar a producirse la extinción completa del campo total en el centro del patrón, cualquiera que sea el radio L del disco o la distancia de observación z , lo que explica la presencia permanente del punto luminoso de Poisson.

En definitiva, podemos afirmar que la diferencia entre que el punto central de los patrones de difracción pueda presentar o no valores de intensidad nula a determinadas distancias está del todo ligada a que las ondas elementales procedentes del objeto difractante posean o no amplitudes aproximadamente iguales (con fases diferentes). En uno y otro caso, serán de aplicación las expresiones (5) y (6), respectivamente, como aquí se ha hecho para la abertura circular y para el disco opaco. Dicho en otras palabras, cuando no resulte admisible la aproximación de considerar de igual amplitud (que no fase) los campos de difracción elementales que alcanzan el centro del patrón de difracción, entonces la intensidad de luz presentará un valor no nulo en dicho punto. La sorpresa que *a priori* producía la observación de los patrones de difracción de este experimento queda así disipada.

Conclusiones

La celebración de la efeméride del experimento sugerido por Poisson, que cuestionaba la teoría ondulatoria de la difracción propuesta por Fresnel y cuyo resultado condujo precisamente a su confirmación, nos ha permitido recordar la importancia que merece esta teoría y su contribución al avance de la ciencia en general y de la óptica en particular.

La reproducción del experimento ha permitido observar los patrones de difracción de un disco circular opaco y de un agujero circular y constatar los dos hechos más relevantes acerca del punto central: la aparición del punto luminoso de Poisson en el primer caso y la desaparición de la luz a determinadas distancias de observación en el segundo.

Se ha comprobado cómo la aplicación del modelo de la difracción de Fresnel permite la justificación de los hechos observados con argumentos estrictamente matemáticos. De manera análoga, la interpretación física del problema basada en el principio de propagación de las ondas de Huygens y el principio de interferencias también ha permitido justificar los hechos observados. Por todo ello, se reafirma la validez del modelo ondulatorio para explicar el fenómeno de la difracción de la luz.

Por último, se ha puesto en evidencia ante los estudiantes la importancia de la experimentación para corroborar y establecer una teoría física.

Bibliografía

- CARRERAS, C.; M. YUSTE y R. VIEJO (1995): «La luz a través de la Historia. II: El siglo de las ondas», video educativo, Centro de Estudios de Medios Audiovisuales (CEMAV)-Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), (16:06 min), <https://www2.uned.es/fis-3-optica/videos/la_luz/video_luz.htm> [12/2/2019].
- CARRERAS, C. *et al.* (2016): «La difracción de Fresnel: dos siglos de esplendor de las ondas luminosas», ponencia, VII Taller Iberoamericano de Enseñanza de la Física Universitaria (Tibero), La Habana, marzo.
- GOODMAN, J. E. (2008): *Introducción a la Óptica de Fourier, Cuadernos de la UNED*, n.º 287, Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED). Traducción de Carmen Carreras Béjar y Octavio Calzadilla Amaya. ISBN: 9788436255614.
- SÉNARMONT, HENRY HUREAU DE; ÉMILE VERDET y LÉONOR FRANÇOIS FRESNEL (1866): *Œuvres complètes d'Augustin Fresnel: Théorie de la lumière, Paris: Imprimerie impériale*, <https://books.google.fr/books/about/%C5%92uvres_compl%C3%A8tes_d_Augustin_Fresnel_Th.html?id=3QgAAAAAMAAJ&hl=es> [12/2/2019].
- YOUNG, T. (1802): «The Bakerian Lecture: On the Theory of Light and Colours», *Philosophical Transactions*, Royal Society, London, vol. 92, pp. 12-48.



La temática sobre el universo en un máster de formación de profesorado

ISABEL VERÓNICA TRICIO GÓMEZ*

Introducción

Es bien conocido que las declaraciones de La Sorbona (1998) y Bolonia (1999) iniciaron un proceso para promover la convergencia entre los sistemas nacionales de educación y desarrollar el Espacio Europeo de Educación Superior (EEES), antes del año 2010. Para consolidar el EEES los sistemas universitarios coincidieron en una estructura común de tres ciclos formativos (grado, máster y doctorado), que facilitan a estudiantes, docentes e investigadores desarrollar su currículum académico y profesional. Posteriormente, también se establecerían en el año 2006 las bases para el desarrollo del Espacio Iberoamericano de Educación Superior (EIBES), que de forma más genérica se conoce como Espacio Iberoamericano del Conocimiento (EIC).

En relación con el ciclo formativo de Máster en España, desde el curso académico 2009-2010 la Universidad de Burgos (UBU) oferta ocho especialidades del Máster Universitario en Profesor de Educación Secundaria Obligatoria, Bachillerato, Formación Profesional y Enseñanzas de Idiomas (MFP) (UBU, 2009), que son estudios de 60 créditos ECTS (European Credit Transfer and Accumulation System o Sistema Europeo de Transferencia y Acumulación de Créditos), diseñados para enseñanza presencial y con carácter profesional para la función docente no universitaria.

Desde hace años se ha hecho evidente la necesidad de incorporar la cultura científica dentro de los currículos académicos de secundaria y bachillerato. Diversos investigadores en didáctica afirman que la astronomía es una de las ramas de la ciencia que despierta gran interés

* Departamento de Física, Universidad de Burgos, España.

desde edades muy tempranas, y no se duda de su importancia educativa (Acevedo Díaz, 2004; Gil-Pérez y Vilches, 2005; Franco-Mariscal y López-Flores, 2017). Se deriva de ello la importancia que tiene un adecuado conocimiento de la ciencia actual en los estudiantes del MFP, quienes, en su futura actividad profesional, se convertirán en nuevos profesores de esos niveles educativos no universitarios (Polanco Erazo, 2017; Tricio, 2018). Desde el curso 2009-2010 hasta el 2017-2018 inclusive, este máster ha venido incorporando la materia obligatoria Ciencias en la Sociedad del Siglo XXI (CCSXXI), y dentro de ella una unidad dedicada a nuestro lugar en el universo. Esta formación académica está destinada a los alumnos matriculados en las dos especialidades de Física y Química y de Biología y Geología.

1. Ciencias en la sociedad del siglo XXI

Sin antecedentes similares en los antiguos estudios de la UBU anteriores a Bolonia, y por ser de nuevo formato, CCSXXI fue diseñada desde el principio para el MFP, adaptada al Proceso de Bolonia y en la línea de los nuevos planes de estudio del EEES (<http://www.eees.es/>). Ha sido preparada con una estrategia orientada a una formación multidisciplinar, adquisición de competencias por los estudiantes, utilización de tecnologías emergentes y programación de actividades docentes presenciales y no presenciales.

En la UBU se oferta CCSXXI en ambos módulos (Física y Química, Biología y Geología) como una asignatura obligatoria de 5 ECTS, ubicada en el primer semestre de septiembre a febrero. En la tabla 1 se indica la materia en la que está incluida dentro del módulo específico de Biología y Geología.

Tabla 1. La asignatura CCSXXI en el módulo de Biología y Geología

MATERIA	ASIGNATURA	CARÁCTER/ECTS
Complementos para la Formación Disciplinar en Biología y Geología	Contenidos de Biología para el Acceso a la Función docente	Optativa/5
	Contenidos de Geología para el Acceso a la Función Docente	Optativa/5
	Ciencias de la Sociedad del Siglo XXI (especialidad Biología y Geología)	Obligatoria/5
Aprendizaje y Enseñanza de la Biología y Geología	Diseño Curricular de Asignaturas de Ciencias Experimentales	Obligatoria/4
	Didáctica de la Biología	Obligatoria/5

Tabla 1. La asignatura CCSXXI en el módulo de Biología y Geología (cont.)

MATERIA	ASIGNATURA	CARÁCTER/ECTS
Aprendizaje y Enseñanza de la Biología y Geología	Didáctica de la Geología	Obligatoria/5
Innovación Docente e Innovación a la Investigación Educativa	Innovación Docente e Innovación a la Investigación Educativa	Obligatoria/4

Esta asignatura presenta la particularidad de ser una de las disciplinas transversales y de amplio espectro de contenidos en los estudios universitarios del MFP en la UBU (Tricio, 2010). La docencia está distribuida entre tres áreas de conocimiento y departamentos universitarios de la UBU, a saber: el Departamento de Física, el de Biotecnología y Ciencia de los Alimentos, y el de Química; la coordinación de la asignatura quedó a mi cargo. El programa de CCSXXI se asienta en 16 temas distribuidos en 5 bloques de amplio recorrido temático para no especialistas. En los tres siguientes participa el Departamento de Física: Unidad I. «Nuestro lugar en el Universo» (4 temas), Unidad II. «Hacia una gestión sostenible del planeta» (3 temas) y Unidad IV. «La aldea global: de la sociedad de la información a la sociedad del conocimiento» (3 temas). La Unidad III. «Nuevas necesidades, nuevos materiales» (2 temas) ha sido asignada al Departamento de Química; mientras que la Unidad V. «Vivir más, vivir mejor» (4 temas) está asignada al Departamento de Biología. El reparto en ECTS a las áreas es: 35 % Física Aplicada, 40 % Biología y 25 % Química Inorgánica.

En el cuadro 1 se muestran, para el curso 2017-2018, las unidades temáticas con sus descriptores, de los tres bloques en los que he tenido la responsabilidad de la docencia.

Cuadro 1. Bloques, temas y descriptores

UNIDAD I	<ul style="list-style-type: none"> • «El origen del Universo». Teorías sobre su origen y evolución. El método científico. La génesis de los elementos. Exploración del sistema solar. Principales aportaciones y situación actual. • «La formación de la Tierra». La formación de la Tierra y la diferenciación en capas. Lytle y los principios de la geología. Wegener y la deriva de los continentes. La tectónica global.
UNIDAD II	<ul style="list-style-type: none"> • «Aire, agua, suelo, seres vivos y fuentes de energía como recursos limitados». Recursos, crecimiento y límites. La Tierra como sistema. Energía, concepto, tipos, fuentes y usos. Nuevas fuentes de energía, presente y futuro. Riesgos y catástrofes, tipos y distribución.

Cuadro 1. Bloques, temas y descriptores (cont.)

UNIDAD II	<ul style="list-style-type: none"> • «Impactos sobre el planeta». Definiciones, causas y tipos de impacto ambiental. Contaminación y medioambiente. Efectos locales, regionales y globales de la contaminación. Clima y meteorología. Cambio climático. • «La gestión del planeta». Gestión ambiental, conceptos y métodos. De la gestión ambiental a la gestión sostenible. Principios generales de sostenibilidad económica, ecológica y social. La responsabilidad individual y colectiva. La educación para la sostenibilidad.
UNIDAD IV	<ul style="list-style-type: none"> • «La revolución tecnológica de la comunicación». Evolución histórica de las comunicaciones. Principios y leyes físicas de la comunicación. Transmisión por cable e inalámbrica. Internet: conceptos, aplicaciones y nuevas tecnologías.

Se presenta en este trabajo la experiencia docente en relación con los descriptores específicos de la primera unidad temática «El origen del Universo», correspondiente a la Unidad I, que forma parte de los seis temas de CCSXXI (cuadro 1), en los que he sido la docente durante los nueve años de vigencia de la asignatura.

2. Proceso de enseñanza-aprendizaje en la temática sobre el universo

Durante el proceso educativo hay que atender, entre otras consideraciones, la particularidad de que la temática sobre el universo está incluida en una de las asignaturas transversales y de amplio espectro de contenidos en los estudios universitarios del MFP. Además, en este nivel superior de formación se sigue un modelo participativo y comunicativo, en el que el profesor orienta y guía el aprendizaje práctico de estudiantes que llegan con diferente formación y que se preparan para su futuro profesional. Se persigue el objetivo docente de tratar de enseñar no solo conocimiento y destrezas, sino también herramientas y habilidades que ayuden al alumno a ser un buen profesor, adecuadamente formado. Los contenidos se trabajan con una orientación CTSA (ciencia, tecnología, sociedad y ambiente). Por último, es preciso considerar también la conexión natural que hay con los contenidos sobre el universo en las asignaturas que en España se incluyen en el currículo formativo del bachillerato y en la enseñanza secundaria obligatoria (ESO). Algunas de las ideas comentadas en los párrafos anteriores han sido desarrolladas en trabajos anteriores (Tricio, 2010).

En el transcurso activo enseñanza-aprendizaje de cada curso académico de la UBU, la referencia siempre es la «Guía docente», en la que se describen, entre otros aspectos, los contenidos temáticos, el tipo de

actividades formativas, las fuentes de información, las competencias a adquirir por el estudiante, los sistemas de evaluación y los resultados previstos del aprendizaje.

La temática sobre el universo es muy apropiada para lograr algunos de los objetivos docentes que se proponen en la guía. Uno de ellos es el de utilizar conceptos, leyes y teorías científicas para poder opinar de manera fundamentada y crítica sobre diferentes cuestiones científico-tecnológicas. Se realizan diversas actividades formativas para la enseñanza de los conceptos y contenidos de esta materia mediante sesiones presenciales y docencia asíncrona interactiva (a través de la plataforma UBUVirtual).

Durante estos nueve años de experiencia docente se ha seguido la estrategia de abordar contenidos renovados y aplicaciones de interés, presentar problemas y ejercicios sugestivos, además de realizar prácticas y actividades complementarias atractivas. En la enseñanza de esta temática sobre el universo se hace evidente la importancia que tienen aspectos didácticos como:

- Contextualizar el tema en la asignatura de CCSSXXI. Determinar el ¿por qué?, ¿cómo?, ¿para qué?, ¿qué se conoce ahora?, ¿qué avances se han dado?, ¿qué queda por resolver en el estudio del universo?
- Atender a las primeras aproximaciones al estudio del tema. ¿Qué quieren los alumnos del Máster como futuros profesores de secundaria conocer del universo?, ¿qué retos de aprendizaje se plantean estos estudiantes del Máster?
- Indagar cómo hacer la alfabetización científica de los jóvenes: ¿qué necesitarán los alumnos del nivel de secundaria en relación con contenidos y habilidades-competencias sobre el origen y la evolución del universo?

A modo de síntesis, en la tabla 2 se muestra la metodología utilizada en los contenidos temáticos que se trabajan con los alumnos.

Tabla 2. Contenidos temáticos y método

Conceptos	Una batería de actividades sencillas y de tipo pregunta-respuesta y/o cuestionario, se realizan durante el desarrollo de cada apartado.
Contextualización	Se considera el avance histórico y reciente en la ciencia y la tecnología de los tópicos que tratan los descriptores.

Tabla 2. Contenidos temáticos y método (cont.)

Resultados y datos científicos	Se presentan y analizan valores actualizados e históricos, así como posibles escenarios de futuro en la investigación sobre el universo.
Gráficos y diagramas	Se emplean frecuentemente durante las presentaciones de los temas de la unidad.
Teorías y tecnologías	Se resaltan aquellas de «punta» y también descubrimientos e hitos científicos que aportan artículos periodísticos y didácticos.
Fuentes bibliográficas auxiliares	Monografías y direcciones web.
Materiales docentes	En la plataforma UBUVirtual (presentaciones PPT, informes técnicos, artículos de divulgación científica, entrevistas a científicos, etc.).

Respecto de las fuentes bibliográficas auxiliares, y a modo de ejemplo, se indican a continuación algunas de las monografías y direcciones web más utilizadas en el aula y recomendadas a los alumnos durante el transcurso de la materia:

- Sitio web AstroMía,
- European Space Agency,
- Ciencias para el mundo contemporáneo: guía de recursos didácticos,
- Información sobre las infraestructuras y trabajos de Astronomía del Instituto Geográfico Nacional, Constantes universales: Astronomía #7,
- <https://eyes.nasa.gov/>,
- La ciencia para todos. Astronomía, <https://www.fecyt.es/es/tematica/astronomia>,
- Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC),
- <https://www.eso.org/public/archives/presskits/pdf/presskit_0004.pdf>,
- Asociación Valenciana de Astronomía,
- <http://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/11462/1/REVISTA-DE-CIENCIAS-2013-1-LaExploracionDelSistemaSolar.pdf>,
- El Universo, la Vía Láctea y el Sistema Solar, Ministerio de Educación, <<http://recursos.cnice.mec.es/biosfera/alumno/1ESO/Astro/contenido1.htm>>,
- El Universo, la vía Láctea y el Sistema Solar, Actividades interactivas, Ministerio de Educación, <<http://recursos.cnice.mec.es/biosfera/alumno/1ESO/Astro/actividades.htm>>,

- Maravillas del Universo. Mediciones,
- <<http://rsefalicante.umh.es/astrologia.htm>>,
- Exposición El Universo para que lo descubras, <http://www.ciudadciencia.es/exposiciones/el-universo-para-que-lo-descubras/>,
- Sitio web del Año Internacional de la Astronomía.

De manera sintética, en la tabla 3 se muestra la metodología utilizada en las actividades formativas que se realizan en la materia sobre el universo.

Tabla 3. Actividades formativas y método

Iniciadora del tema	Lluvia de ideas inicial que estimula en los estudiantes a formar criterio. Foros de debate en el aula sobre tópicos de controversia ciudadana que suelen difundir los medios de comunicación.
Discusión en grupo	Se utilizan para alguno de los contenidos desarrollados en los temas en la clase presencial, mediante la respuesta a una pregunta (o debate de una afirmación), algún problema concreto o una actividad propuestos por el profesor o por los alumnos. (Documentales, lectura de artículos, etc.).
Tarea individual	Realización de tareas cortas, que el estudiante entrega a través de la plataforma y el profesor puede evaluar directamente en ese entorno virtual. (Mapas conceptuales, selección de videos didácticos, propuestas para el informe o las fichas).
Temáticas amplias	Análisis y síntesis, mediante tareas largas, de documentos, páginas web, videos e informes técnicos.
Informe científico	Actividad muy requerida por los alumnos. Trabajo monográfico extenso individual o en grupo. El alumno elige la temática que el profesor debe aceptar. Se enfoca en documentar aspectos que han sido desarrollados o sugeridos en clase presencial por el profesor. Para su ejecución pueden disponer de material auxiliar. Se entrega a través de la plataforma virtual. Tiene un elevado peso en la evaluación del alumno.
Proyecto de fin máster	Está englobado como parte del periodo de prácticas del máster del profesorado. El TFM (trabajo de fin de máster) pretende aportar a la formación de los nuevos profesores: la puesta en práctica de las competencias adquiridas, una profundización en conocimientos, conocer o reflexionar diferentes planteamientos y adquirir destrezas en la redacción de informes y para la exposición ante un tribunal. Cada curso académico el profesor puede o no ofertar algún proyecto de TFM que, a su vez, los estudiantes pueden o no seleccionar.
Fichas	De cada tema, cada equipo de dos alumnos presenta varias opciones y acuerda con el profesor una de ellas. Se trata de elaborar dos documentos breves (para el profesor y para el estudiante de secundaria). Se hace la entrega a través de la plataforma o de correo electrónico. Tiene un elevado peso en la evaluación del alumno.

Respecto a la actividad iniciadora del tema, y a modo de ejemplo, en la figura 1 se muestran algunas carátulas de elaboración propia, de la presentación PPT que se ha utilizado en el curso académico 2012-2013 y los dos siguientes, como inicio de una clase presencial con la participación activa de todo el grupo de alumnos. La noticia a la que hacer referencia la actividad decía: «El CERN detecta neutrinos que superan la velocidad de la luz» (<https://www.libertaddigital.com/ciencia/2011-09-23/el-cern-detecta-neutrinos-mas-rapidos-que-la-velocidad-de-la-luz-1276436131/>).

A modo de introducción

Hace poco más de 2011: recibí un mensaje... ¿Impresión más reciente que la luz...

¿Análiz de qué y cuándo ha surgido esta noticia en la prensa de nuestro país? ¿Qué experimentos son esos? ¿Qué sabemos de los neutrinos? ¿Qué sabemos del experimento OPERA? ¿Qué es el laboratorio Gran Sasso y que se hace en él? ¿Qué es el CERN?

Preguntas relacionadas:

¿Qué es un nanosegundo? ¿Qué es el límite de la velocidad de la luz? ... ¿Qué consecuencias para la ciencia y la sociedad traen estos resultados?

Hace después (8-2012) informaron los medios... Un experimento del laboratorio italiano de Gran Sasso ha confirmado que los neutrinos no son más rápidos que la luz, según ha anunciado el Centro Europeo de Física de Partículas (CERN).

http://www.elpais.com/elpais/2012/08/07/tecnologia/1344388000_000000.html

Para saber más:

http://www.youtube.com/watch?v=73881739_497C_QE
http://www.youtube.com/watch?v=Q25uqy73881739_497C_QE

Hace menos tiempo (4-2012) todos hablaban del bosón de Higgs... ¿Qué es el bosón de Higgs? ¿Por qué es tan importante? ...

Hoy viene publico en la revista 4/2012 el bosón de Higgs la partícula de Dios en Nature

<http://www.quecualquier.com/actualidad/2012/04/25/quecualquier-higgs-experimento-4/2012-04-25-142508201436015.html>

Don Lincoln, científico del Fermilab y otros científicos (John Ellis, físico del departamento teórico del LHC) hacen divulgación de la noticia. El describe la naturaleza del bosón de Higgs. Varios grupos experimentales grandes están tras la pista de esta partícula "subatómica" que se premia para explicar el origen de la masa de las partículas.

Preguntas relacionadas:

¿Qué sabemos del campo de Higgs? ¿quién es Higgs? ¿Qué son las partículas elementales?

Para saber más:

http://www.youtube.com/watch?v=73881739_497C_QE
http://www.youtube.com/watch?v=Q25uqy73881739_497C_QE

Hace aún menos tiempo (VII-2013) el bosón de Higgs está en todas partes... ¿y que es el campo de Higgs?

El País Científico de la Universidad de Valencia (UV) ha presentado el microdocumental «Higgs: la masa» que explica «de forma sencilla» a través de un video de seis minutos de duración y subtítulo en inglés la «herencia» del descubrimiento del Bosón de Higgs, según ha informado la institución académica en un comunicado.

http://www.abc.es/abc/ciencia/20130720/130720ciencia_valencia_higgs_201307201227.html

Para saber más: http://www.youtube.com/watch?v=73881739_497C_QE
http://www.youtube.com/watch?v=Q25uqy73881739_497C_QE

Figura 1. Presentación de un ejemplo de actividad iniciadora del tema

A modo de introducción

¿quién es Peter Higgs?

En wikipedia han actualizado rápidamente la información sobre este científico.
http://es.wikipedia.org/wiki/Peter_Higgs

El físico (25-VI-1925) que postuló en 1964 la existencia del bosón que lleva su nombre hará ayer cuando Pascale Cabot (portavoz del experimento ATLAS, anunció el hallazgo de una nueva partícula que podría ser la que el físico «Higgs» supuso de que haya cuando tan rígida. En palabras, nunca pensó que podría a algo así en vida y vivió a pedir a mi familia que ponga atención a mí en la noticia», anunció Peter Higgs, de 82 años y profesor emérito de la Universidad de Edimburgo.



Preguntas relacionadas:
 ¿Quién más?

Para saber más: buscar información en fuentes serias

Personas relacionadas:
 Peter Higgs, Francis Englert, Robert Brout, Gerald Gounand, Carl H. Pegg

¿qué ha pasado desde entonces?

P. Higgs, Premio Príncipe de Asturias de Investigación Científica y Técnica (2013)
 En el año 2013, se concede el premio Nobel de Física a P. Higgs (Reino Unido) y François Englert (Belgica) «por el descubrimiento teórico de un mecanismo que contribuye a nuestra comprensión del origen de la masa de las partículas subatómicas, y que recientemente fue confirmado a través del descubrimiento de la partícula fundamental prevista por los experimentos ATLAS y CMS en el gran colisionador de hadrones del CERN»

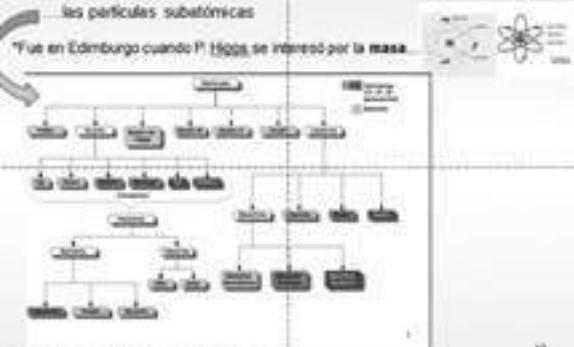
“Fue en Edimburgo cuando se interesó por la **masa**”

Preguntas relacionadas:
 ¿Qué otros científicos han recibido el Nobel? ¿Hay alguna mujer con este premio? ¿Hay alguna relación entre la financiación para la I+D y nivel de la ciencia en los países?
 ¿España ha concedido algún premio a Peter Higgs?
 Aspecto social... ¿Que inventen ellos... ¿quién lo dijo, en qué época? (Miguel de Unamuno https://es.wikipedia.org/wiki/Que_inventen_ellos?)

Para saber más:
http://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Ganadores_del_Premio_Nobel_de_Fisica

las partículas subatómicas

“Fue en Edimburgo cuando P. Higgs se interesó por la **masa**”



PARTICULAS SUBATÓMICAS

Se han creado partículas de Peter Higgs...
http://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Ganadores_del_Premio_Nobel_de_Fisica

Figura 1. Presentación de un ejemplo de actividad iniciadora del tema (continuación).

En las imágenes de la figura 1 se observa cómo a partir de una noticia de prensa de plena actualidad, de noviembre del año 2011, se van formulando las primeras preguntas sobre los aspectos científicos que se describen en la noticia. El profesor ha diseñado la actividad didáctica de manera que permita también indagar sobre contenidos de mayor calado en la ciencia y la tecnología, utilizando también otras noticias de prensa y fuentes bibliográficas aportadas «para saber más».

En resumen, con esta metodología se trabajan conceptos y tecnologías de gran actualidad e interés científico, tecnológico y social, tal como se deduce de las imágenes presentadas.

Conclusiones

Se ha presentado una experiencia docente llevada a cabo en la Universidad de Burgos para alumnos del Máster en Profesor de Educación Secundaria Obligatoria, Bachillerato, Formación Profesional y Enseñanza de Idiomas.

Durante los nueve años de experiencia docente en la temática sobre el universo se han preparado estrategias para abordar contenidos renovados y aplicaciones de interés, presentar noticias actuales y ejercicios sugestivos, además de realizar prácticas y actividades complementarias atractivas.

Se han tratado tópicos centrales de la temática sobre el universo en la asignatura Ciencias en la Sociedad del Siglo XXI, cuyos contenidos científicos y tecnológicos están en constante cambio y sometidos a un bombardeo incesante de nueva información. Por ello, es necesario preparar materiales docentes actualizados en los sucesivos cursos, lo que, a su vez, tiene como resultado una mejora docente continua.

Los resultados obtenidos por los estudiantes permiten afirmar que se ha alcanzado el objetivo docente de enseñar herramientas y habilidades que ayudan al alumno a ser un buen profesor, adecuadamente formado, además de proporcionarles conocimiento y destrezas.

Con el diseño y el desarrollo de las actividades didácticas propuestas en la temática sobre el universo los estudiantes:

- Han obtenido, seleccionado y valorado informaciones sobre distintos temas científicos y tecnológicos de repercusión social y han comunicado conclusiones e ideas en distintos soportes a sus propios compañeros y al profesor, utilizando

las tecnologías de la información y la comunicación como instrumento de aprendizaje.

- Han sabido realizar estudios sencillos con base científico-tecnológica de la temática seleccionada del cosmos.
- Han mostrado actitudes como la reflexión crítica, la creatividad, y el respeto al medioambiente.

De manera general, se puede concluir que esta experiencia docente ha resultado muy satisfactoria. Los estudiantes del Máster de Profesorado que han seguido los cursos relativos a la temática sobre el universo otorgaron una elevada valoración tanto a los contenidos que se abordan como a la metodología docente utilizada en las actividades desarrolladas en los distintos cursos académicos.

Bibliografía

- ACEVEDO DÍAZ, J. A. (2004): «Reflexiones sobre las finalidades de la enseñanza de las ciencias: educación científica para la ciudadanía», *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, vol. 1, n.º 1, Universidad de Cádiz, pp. 3-16.
- FRANCO-MARISCAL, A. J. y V. M. LÓPEZ-FLORES (2017): «Retención de los conocimientos sobre el Universo», *Revista Mexicana de Investigación Educativa*, vol. 22, n.º 72, pp. 235-271.
- GIL-PÉREZ, D. y A. VILCHES (2005): «Inmersión en la cultura científica para la toma de decisiones, ¿necesidad o mito?», *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, vol. 2, n.º 3, Universidad de Cádiz, pp. 302-329.
- POLANCO ERAZO, Y. (2017): «Enseñanza de astronomía estelar a docentes en formación en ciencias naturales», tesis doctoral, Universidad del Valle, <<http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/10263/1/7414-0525597.pdf>> [12/3/2018].
- TRICIO, V. (2010): «Hacia una gestión sostenible del planeta en el nuevo Máster de Profesorado», en *VI Congreso Internacional Didáctica de las Ciencias*, CD-ROM, La Habana: Educación Cubana, UNESCO/Instituto Pedagógico Latinoamericano y Caribeño (IPLAC), pp. 1-22.
- TRICIO, V. (2012): «Actividades formativas en sostenibilidad y desarrollo sostenible en el Máster de Profesorado de la Universidad de Burgos», en J. Fuentes, A. Pérez y O. Calzadilla, *VI Taller Iberoamericano de la Enseñanza de la Física Universitaria*, CD-ROM, La Habana, pp. 139-149.

TRICIO, V. (2018): «Las ciencias en la sociedad del siglo XXI. Una experiencia docente en el Máster de Formación de Profesorado», ponencia, I Congreso Iberoamericano de Docentes (modalidad virtual), Cádiz, 20 de noviembre-8 de diciembre.

UNIVERSIDAD DE BURGOS (2009): «Plan de estudios curso 2009/2010 y curso 2016/17», <https://www.ubu.es/sites/default/files/portal_page/files/p_mprofeso_6.pdf> [2/3/2018].



Establecimiento de un laboratorio de microgravedad en vehículos suborbitales

JOSÉ REFUGIO MARTÍNEZ,* G. SAUCEDO-ZÁRATE,** J. A. DE LA CRUZ-MENDOZA,*** E. VÁZQUEZ-MARTÍNEZ,**** H. GONZÁLEZ-AGUILAR,* G. ORTEGA-ZARZOSA* Y J. L. ARAUZ-LARA****

Introducción

La experimentación en microgravedad y sus aplicaciones en física y en diferentes disciplinas ha crecido de manera importante en los últimos años. La microgravedad permite a los científicos observar y estudiar fenómenos que estarían velados por los efectos de la interacción gravitacional terrestre. La NASA ha sido una de las instituciones de investigación que ha desarrollado laboratorios capaces de producir ambientes de microgravedad para la investigación científica, como la Oficina de la Vida y las Ciencias Microgravitacionales y la División de Investigación en Microgravedad, que se encarga de supervisar el desarrollo de las investigaciones en física, química y biología en ambientes de gravedad reducida.

Algunos de los actuales temas de investigación son:

1. El crecimiento de cristales proteicos de alta calidad necesarios en la investigación médica: el principal obstáculo para lograrlo son los efectos de la gravedad.
2. Mejoras en los procesos de la combustión que al eliminar la convección mediante microgravedad facilita el estudio de este

* Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México; Instituto Mexicano del Espacio Ultraterrestre, A. C., San Luis Potosí, México.

** Instituto Mexicano del Espacio Ultraterrestre, A. C., San Luis Potosí, México.

*** Instituto Mexicano del Espacio Ultraterrestre, A. C., San Luis Potosí, México; Instituto de Física, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México.

**** Instituto de Física, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México.

- proceso, cuyo entendimiento ayudaría a resolver problemas como la contaminación, el calentamiento global, entre otros.
3. La investigación en mecánica de fluidos: la gravedad tiene una influencia importantísima en el comportamiento de los fluidos.
 4. Diferentes líneas de investigación en física fundamental, ciencia de materiales, química y biología (<https://www.nasa.gov/centers/marshall/news/background/facts/microgravity.html>).
 5. La mecánica de flujos granulares: la velocidad del flujo, el empaquetamiento y concentración del material son factores que en ambiente de gravedad resulta prácticamente imposible separar a fin de determinar la transición de comportamiento de arrastre granular. Conocer el comportamiento de estos materiales ayuda a manejar y almacenar de manera adecuada granos alimenticios, cuyas pérdidas por un mal manejo representan el 30 % del total de las cosechas (Hernández-Cordero *et al.*, 2000; Chehata, Zenit y Wassgren, 2003; Wassgren *et al.*, 2003).
 6. Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en la Tierra con la fabricación de membranas artificiales en microgravedad (https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/news/cemsica_membrane_technology).
 7. Producción de medicamentos encapsulados por resinas degradables en el organismo, las cuales representan la posibilidad de administrar medicamentos por vía corriente sanguínea o aplicación local, como serían drogas antitumor, antibióticos y trombolíticos en microcápsulas de liberación programada.

El conocimiento derivado de tales investigaciones y desarrollos no se incorpora en los programas de cursos de Física Básica, pues la mayoría de los casos estudiados suceden en la superficie terrestre, donde la gravedad afecta de manera importante estos procesos físicos. Así, de las cantidades físicas asociadas a estos fenómenos, la aceleración debida a la gravedad constituye una que básicamente no cambia, por lo que sus efectos en estos fenómenos no se discuten. Una comprensión completa de esos fenómenos solo se puede lograr si de alguna manera la fuerza debida a la interacción gravitacional se eliminara (Zenit, 2003).

La intensidad de la interacción gravitacional puede estimarse por la aceleración producida, que suele denotarse por g . Este valor depende de varios factores como la altura respecto al nivel del mar. En los libros de texto, un valor característico y muy socorrido en las situaciones problemáticas planteadas es el de $9,8 \text{ m/s}^2$ (metros sobre segundo al cuadrado), que bajo ciertos mecanismos puede hacerse variar. De esta manera, al dejar caer un objeto, este caerá con una aceleración de g , valor que puede ser aumentado o disminuido. Si lo disminuimos a fin de tener fracciones del valor g y en consecuencia disminución del peso aparente del objeto, estaríamos produciendo procesos de interacción en microgravedad. Un ambiente de microgravedad es aquel en el cual el peso aparente de un objeto es muy pequeño comparado con el peso del objeto debido a la interacción gravitacional.

Varios son los mecanismos con los cuales podemos crear ambientes de microgravedad. Uno de ellos es el uso de cohetes de sondeo, los cuales pueden producir tiempos de microgravedad del orden de minutos. Este tiempo es muy superior a otros sistemas en ambientes terrestres, como las torres de caída libre o vuelos con trayectoria parabólica en aviones, que son del orden de segundos. De esta manera los cohetes de sondeo son una importante vía para realizar investigación y docencia en dichos temas.

Torres de caída libre arriba de los cien metros proporcionan tiempos de gravedad reducida de forma controlada, del orden de 5,2 s. En estas suele evacuarse el aire dentro de la torre, reduciéndose los efectos de arrastre aerodinámico, se pueden alcanzar ambientes de hasta $10^{-5}g$. Si se utilizan aviones pueden alcanzarse tiempos de microgravedad de hasta 30 s. En este caso los efectos aerodinámicos no pueden eliminarse, por lo que se logran ambientes de $10^{-3}g$, para ello el avión asciende a un ángulo de 45° , para después seguir una trayectoria parabólica; la aceleración centrípeta generada por la trayectoria cancela la aceleración gravitacional, produciéndose el ambiente de gravedad reducida. Posteriormente el avión desciende de nuevo a un ángulo de 45° y la tripulación está expuesta a ambientes de aproximadamente 2,5 g.

Un cohete de sondeo suborbital permite tener hasta siete minutos de ambiente de gravedad reducida. Estos cohetes también siguen una trayectoria parabólica en las altas capas de la atmósfera, haciendo despreciables los efectos aerodinámicos; durante esta trayectoria se produce el ambiente de microgravedad. En este caso se logran ambientes de gravedad reducida del orden de $10^{-5}g$.

En 1957 se lanzó por primera vez en México un cohete con fines científicos en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP); pero el trabajo con cohetes se interrumpió en la década de los setenta del siglo *xx*. Recientemente se han reiniciado en la UASLP, en coordinación con el Instituto Mexicano del Espacio Ultraterrestre (INMEU), los trabajos de diseño y construcción de cohetes de sondeo. Estos cohetes de nueva generación tendrán entre sus misiones realizar experimentos en ambientes de microgravedad con fines científicos y educativos, con el objetivo, entre otros, de brindar servicio a las universidades latinoamericanas.

Se presentan en este trabajo los detalles técnicos de los cohetes Félix, resultados de las pruebas estáticas, las características de la bahía de carga para la implementación de experimentos de microgravedad y los eventuales servicios para experimentos de investigación y educativos.

1. Laboratorio de Microgravedad Cabo Tuna

El programa de diseño, construcción y lanzamiento de cohetes de sondeo iniciado en 1957 culminó, en su primera etapa, en 1972 con el lanzamiento de Filoctetes II, un cohete de dos etapas de combustible sólido. El lugar donde se lanzaban estos cohetes fue bautizado como Cabo Tuna y con ese nombre se conoce en la actualidad el histórico programa.

Física I, primer cohete lanzado en México con fines científicos, surcó los cielos del altiplano potosino el 28 de diciembre de 1957 y abrió el camino en el área aeroespacial en el país. El cohete fue diseñado y construido por profesores y estudiantes del entonces naciente Departamento de Física de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, que tenía a su cargo la carrera de Física y el Instituto de Física.

Esta aventura de diseño, construcción y lanzamientos de cohetes se desarrolló a lo largo de quince años; se lanzaron cohetes de sondeo de una y dos etapas, en diversas series que llevaron los nombres de Física, Zeus, Olímpicos, Filoctetes, entre otros. En 1972 se interrumpió este esfuerzo y declinó el esfuerzo nacional en materia espacial al desaparecer años después la Comisión Nacional del Espacio Exterior, creada en principio para unir esfuerzos en México con el grupo potosino y el de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), que en 1959 lanzara desde la Hacienda de la Begoña, en el estado de Guanajuato, el cohete de combustible líquido SCT-1. Uno de los primeros objetivos

era instalar una base nacional de lanzamiento que se ubicaría en la zona desértica del municipio de Charcas, San Luis Potosí.

Los objetivos iniciales del programa consistían en:

1. Satisfacer la «curiosidad científica» de construir objetos que pudieran elevarse más allá de las nubes.
2. Aprovechar los artefactos para provocar la lluvia, mediante la detonación de cargas explosivas en las nubes.
3. Estimular el desarrollo de instrumentación en miniatura y dispositivos de telecontrol.
4. Aprovechar los cohetes como vehículos para realizar investigación científica en las altas capas de la atmósfera.
5. Realizar estudios de la radiación cósmica por el método de emulsiones fotográficas.
6. Determinar el estado de ionización de la atmósfera a diferentes alturas.
7. Medir temperatura, humedad y presión atmosférica en las altas capas de la atmósfera.
8. Estudiar grandes áreas terrestres por medio de fotografías aéreas.

Los objetivos no llegaron a cumplirse en su totalidad y quedó pendiente la realización de investigación científica en altas capas de la atmósfera.

Después de 1972, participantes de la última etapa de Cabo Tuna continuaron trabajando en el tema, y recientemente se ha reiniciado el programa de Cabo Tuna. Se retoma con el Proyecto Fénix, en el punto técnico en que se suspendiera, tanto en San Luis como en la SCT. Participan el Instituto Mexicano del Espacio Ultraterrestre, A. C., depositario de Cabo Tuna, la Sociedad Científica Francisco Javier Estrada y el Instituto de Física de la UASLP, cuna del programa de lanzamiento de cohetes.

Este programa de resurgimiento se ha bautizado como «misiones Fénix» y el programa global como «proyecto Cabo Tuna».

Las misiones Fénix contemplan en su primera etapa la construcción de los cohetes de sondeo Fénix-I- (1 y 2), los cuales se encuentran en la fase de pruebas finales para su eventual lanzamiento en el Puerto Espacial Cabo Tuna en San Luis Potosí, lugar donde se pretendía establecer la base nacional de lanzamiento en Charcas. Estos cohetes constituyen el establecimiento de un Laboratorio de Microgravedad

(LM-Tuna) ubicado en estos vehículos suborbitales, para la realización de investigación científica, así como experimentos docentes, en los que estudiantes de diversos niveles educativos podrán plantear sus experimentos escolares.

2. Cohetes Fénix

Los Fénix son cohetes de combustible sólido, fabricados con acero, que contienen tobera de escape de cono convergente-divergente en su contorno y una cámara de combustión. Estos elementos constituyen el motor cohete de propelente sólido, que se muestra en la figura 1. Los gases del propelente son producidos en la cámara de combustión a una presión gobernada por las características del propelente, su proporción de gasto y la sección transversal del área de la garganta de la tobera, lo que permite que estos sean expulsados al exterior con una velocidad supersónica.

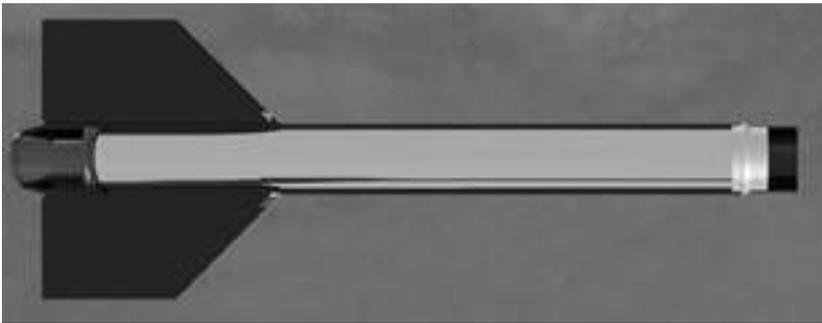


Figura 1. Motor cohete de propelente sólido.

Encima del motor se encuentra la bahía de carga construida con aluminio, cuyas dimensiones iniciales responden a las pruebas de vuelo y el sistema de recuperación del cohete. Posteriormente, sus medidas dependerán de los experimentos a realizar en ambiente de gravedad reducida. Esta bahía aloja los experimentos en una especie de hotel para experimentación. En la parte superior se encuentra la nariz del cohete, construida con aluminio y una punta de cobre para controlar efectos de calentamiento. En la figura 2 se muestra el esquema general del cohete Fénix.

El peso del cohete, sin combustible, es de 80 kg, y el centro de gravedad se encuentra, sin carga, en la parte de la sección del motor.

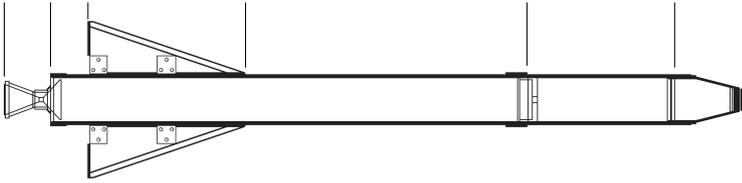


Figura 2. Esquema general del cohete Fénix.

Los cálculos de balística interior del cohete Fénix arrojan un valor de 10,500 Newton en menos de tres segundos, con masa eyectada de 7,5 kg, mientras que el máximo de presión esperada en la cámara es de 6,4 MPa en 1,7 s. Estos valores representan el rango mínimo de operación diseñado para el cohete, que representa una altitud de alrededor de 50 km. El rango en altitud de los cohetes Fénix está entre 35 km a 120 km, dependiendo del propelente a utilizar.

Las pruebas estáticas se encuentran en proceso. Resultados preliminares arrojan los valores representados en las figuras 3 y 4, usando un solo cartucho de combustible con un motor con la tobera diseñada para el Fénix y una cámara de combustión del tamaño del cartucho (figura 3). En la figura 4 se muestran los resultados usando dos cartuchos con el motor completo del cohete Fénix.

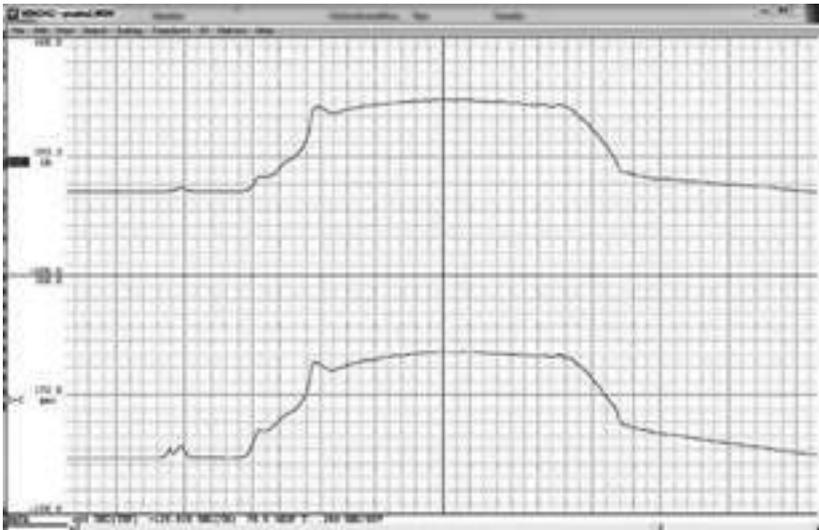


Figura 3. Empuje y presión para motor con un cartucho.

Las pruebas estáticas se realizaron colocando el motor cohete contra el suelo ajustado con sensores sujetos a la plataforma de cemento y al cuerpo del motor, como se muestra en la figura 5, a través de abrazaderas. El motor es soportado en una base que contiene un sensor de presión de la marca Wika tipo A-10 con un rango de 0 a 5 000 psi y una celda de carga, para medir empuje, Honeywell tipo 41-A, con rango de 0 a 2 500 kg.

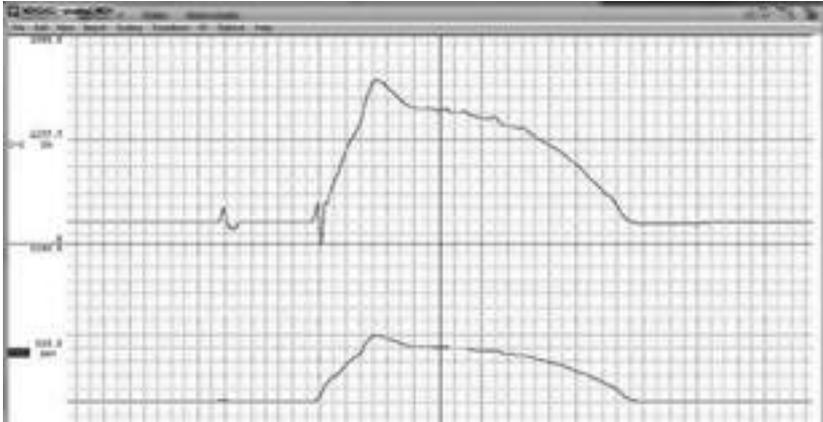


Figura 4. Empuje y presión para motor del cohete Fénix con dos cartuchos de propelente sólido.



Figura 5. Imagen de la prueba estática en el Puerto Espacial Cabo Tuna en San Luis Potosí.

La bahía de carga, para las pruebas de dinámica de vuelo, que es adaptable para experimentos científicos, contiene una computadora de control de la dinámica de vuelo y una computadora de adquisición de datos Intel DCCP847DYE con conexiones USB; cada experimento se realiza con instrumentación específica para conexión a la computadora de adquisición. Las dimensiones de la bahía de carga, en su primer diseño, adaptado como laboratorio de microgravedad (figura 6), son de 15,24 cm de diámetro y 52 cm de largo.



Figura 6. Cohete Fénix I-1 Candelario Pérez Rosales; la parte aluminizada es la bahía de carga, eventual laboratorio de microgravedad.

Conclusiones

La experiencia acumulada en el programa de diseño, construcción y lanzamiento de cohetes en San Luis Potosí, conocido como Cabo Tuna, así como de otros grupos pioneros en este ramo en la década de los sesenta, permite reiniciar el programa con suficiente potencial para la construcción de cohetes de sondeo de combustible sólido y líquido. Con este reinicio se pretende que se puedan cumplir los objetivos iniciales del programa original: la realización de investigación científica en las altas capas de la atmósfera; en aquella época se investigaba la radiación cósmica y en la actualidad se aspira a usar estos cohetes como laboratorios de microgravedad para la investigación científica y la enseñanza de la física. Las pruebas estáticas preliminares de los cohetes Fénix I (1 y 2), Candelario Pérez Rosales y Alejandro Pedroza Meléndez, abren la posibilidad de iniciar los lanzamientos en breve tiempo y después de realizar las pruebas de vuelo, el control dinámico de este y su recuperación, así como implementar la bahía de carga para experimentos de microgravedad en los que puedan participar profesores y estudiantes de universidades latinoamericanas.

Bibliografía

- CHEHATA, D.; R. ZENIT y C.R. WASSGREN (2003): «Dense Granular Flow around an Immersed Cylinder», *Physics of Fluids*, vol. 15, n.º 6, 1622, <<https://doi.org/10.1063/1.1571826>> [23/2/2019].
- HERNÁNDEZ-CORDERO, J.; R. ZENIT, E. GEFFROY y B. MENA (2000): «Experiments on Granular Flow in a Hexagonal Silo; a Design that Minimizes Dynamic Stresses», *Korea-Australia Rheology Journal*, vol. 12, n.º 1, March, pp. 55-67.
- WASSGREN, C. R; J. A. CORDOVA, R. ZENIT y A. KARION (2003): «Dilute Granular Flow around an Immersed Cylinder», *Physics of Fluids*, vol. 15, n.º 11, November, pp. 3318-3330.
- ZENIT, R. (2003): «La microgravedad y su importancia en la investigación científica», *Boletín de la Sociedad Mexicana de Física*, vol. 17, n.º 1, pp. 23-27.



Marie Curie: un legado para la ciencia y la humanidad

ALICIA CID REBORIDO,* J. GRANADOS SAMANIEGO,* F. TAVERA ROMERO,* J. M. VELÁZQUEZ ARCOS*

Introducción

Era como un nuevo mundo abierto para mí, el mundo de la ciencia, que por fin se me permitió conocer la libertad

MARIE CURIE

Manya Sklodowska nació en un antiguo barrio de Varsovia, Polonia, el 7 de noviembre de 1867; su madre había sido directora de una escuela para señoritas y su padre era profesor de Física y de Matemáticas (Jiménez-Reyes y Bulbulian, 1994). En 1871 la pequeña Manya, que apenas estaba por cumplir los cuatro años, sorprendió a su padre y a su hermana de siete años, Bronia, leyendo de corrido, sin dificultad, el texto de un álbum de estampas que la mayor no podía leer con soltura. Al ver la reacción de ambos, que enmudecieron de sorpresa, la pequeña rompió a llorar creyendo que había hecho algo malo y se excusó diciendo: «No lo hice a propósito ¡resulta tan fácil!» (citado por García, 2007, p. 8).

Manya fue una niña muy precoz y sensible, que desde pequeña sufrió la opresión zarista. En esa época el idioma ruso era el único permitido en Polonia y Manya lo hablaba perfectamente, al igual que el polaco, su lengua materna (Jiménez-Reyes y Bulbulian, 1994). Es importante destacar la gran influencia que tanto de su madre como de su padre hubo en Manya, y que más adelante se vería reflejada en su tenacidad y perseverancia en las investigaciones y grandes descubrimientos de la ciencia.

* Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, Tamaulipas, Ciudad de México.

Relata Horacio García (2007):

Manya recibió de su madre una rigurosa actitud ética de fundamento religioso y un sentido del deber ante la vida, aunque más tarde se declaró librepensadora, habría de mantener también una actitud ética que la caracterizaría ante los demás y que sustentaría su actividad científica, actitud acompañada de severidad en el trato, que solo abandonaba ante sus más íntimos amigos. [...] La influencia de su padre profesor de Matemáticas y de Física, supo inspirar intereses culturales a sus hijos, dotando a Manya de una actitud racionalista que inevitablemente tenía que entrar en conflicto con la mentalidad religiosa inspirada por su madre. Una de las acciones más trascendentes del padre fue la de regalarle a Manya, cuando ella tenía apenas siete años, una brújula. La niña quedó fascinada por el aparato y por la conducta de su aguja imantada que le abría un universo de inquietudes y de interrogantes. (pp. 9-10).

Como la mayoría de sus compatriotas, Manya soñaba con la libertad de su patria y deseaba servirla, lo que la condujo a participar en una organización revolucionaria de estudiantes llamada Universidad Volante. Era un movimiento clandestino pero tolerado por la policía del zar, en el que Manya y su hermana Bronia tenían muchos amigos y al que se sumaron para dar clases a los obreros en las fábricas, a los estudiantes en casa particulares y a los campesinos en las aldeas y granjas.

La familia Sklodowska atravesaba por situaciones económicas difíciles, por lo que el padre de Manya decidió que ella debía trabajar para mantenerse, así que asumió un puesto de institutriz en una familia de abogados. El 3 de enero de 1886 se coloca de institutriz de la familia Zorawski; aquí encuentra el primer amor de su vida, Casimir el hijo mayor de la familia. Manya les enseñaba en un pizarrón la historia de Polonia y también a leer y escribir. Casimir le propone matrimonio, sin embargo, los padres de este se opusieron a la boda debido a la condición socioeconómica de ella. A partir de este momento Manya fue tratada como persona inferior y tuvo que soportarlo debido a que enviaba su salario a su hermana Bronia, para que continuara sus estudios en París. En los primeros meses de 1889 solicitó trabajo como institutriz en Varsovia, donde fue aceptada, de esta manera se sintió liberada al dejar la casa de los Zorawski.

1. El placer por la investigación experimental

En Varsovia se encontró con que su primo Józef Boguski (es importante remarcar que había sido ayudante de Dmitri Mendeléiev) tenía un pequeño laboratorio dentro de un Museo de la Industria fundado por él, que puso a disposición de Manya para que su interés por la química se ampliara y profundizara haciendo prácticas sencillas. Manejando un soldador y un bloque de carbono para obtener pequeñas perlas metálicas, un termómetro, electroscopios y equipo sencillo de vidrio para hacer destilaciones, se inició en el mundo de la investigación científica. En palabras de Manya: «Aunque me he dado cuenta de que el progreso en estas materias [física y química] no es ni rápido ni fácil, en el transcurso de estos primeros ensayos se ha desarrollado mi gusto por la investigación experimental» (citado por García, 2007, p. 16). Esta sería su iniciación en el campo experimental y su bautismo de laboratorio.

«En el verano de 1891 se despide con mucha pena de su padre y se va a París al encuentro de su hermana con el billete de tren más barato y una silla plegable para viajar sentada miles de kilómetros», según relata Casado (2007, p. 165).

En el otoño de 1891 llegó Manya (Marie, en francés) a París para inscribirse en la Sorbona con el fin de estudiar Física en la Facultad de Ciencias, donde pudo elegir entre un plantel de ilustres profesores, incluidos premios nobel, como el físico Gabriel Lippmann (American Institute of Physics, s. f.), con el que quiso estudiar. Es importante remarcar que en ese momento Marie sería la primera mujer en cursar estudios superiores. El 3 de noviembre atravesó por primera vez la puerta de La Sorbona. Para una mujer las cosas no eran fáciles: Marie, dedicada al estudio de la física y la matemática, fue consciente de que no tenía bases suficientes para seguir las lecciones que, por otra parte, no entendía del todo porque su francés, que aprendiera en Polonia, era básico. Sufrió esa especial crueldad e intransigencia de los franceses hacia quien no habla correctamente su idioma. Sin embargo, fue perseverante y siguió superándose. En 1892 se dedicó de lleno a estudiar elasticidad y mecánica, y a la vez seguía desarrollando su dominio del francés y la matemática. En 1893 se dedicó al campo de la electrostática y la cinética con los mejores académicos de su tiempo. Finalmente, Marie Sklodowska resultó ser la mejor estudiante de ciencias físicas de la generación y obtuvo su licenciatura por la Universidad de París. En 1893 Marie

regresa a Varsovia y consigue una beca de la Fundación Alexandrowitcha, que se le otorgaba a los estudiantes más brillantes que deseaban seguir sus estudios en el extranjero. Vuelve a París para terminar sus estudios de licenciatura en matemáticas bajo la tutoría de Henri Poincaré y Paul Appell (American Institute of Physics, s. f.).

2. El encuentro con Pierre Curie

En 1891 Marie conoce a Pierre Curie; sobre su primer encuentro con él escribe:

Cuando entré, Pierre Curie estaba en una puerta-ventana que daba a un balcón. Me pareció muy joven, a pesar de que entonces tenía 35 años. Me impresionó la expresión de su clara mirada y la leve apariencia de abandono en su alta estatura. Sus palabras un poco lentas y reflexivas, su sonrisa, a la vez grave y joven inspiraban confianza. Entablamos una conversación que muy pronto se hizo amigable: trataba de cuestiones científicas sobre las cuales me sentía dichosa de preguntar su opinión y también de problemas de interés social o humanitario por lo que ambos nos interesábamos. Entre sus conceptos y los míos, a pesar de la diferencia de nuestros países de origen existía una afinidad sorprendente, atribuible en parte, sin duda, a un cierto parecido de la atmósfera moral del medio familiar en el que cada uno de nosotros había crecido. (citado por García, 2007, pp. 23-24).

A partir de esta afinidad mutua se vieron con más frecuencia debido a que compartían ideales en común.

Finalmente se casaron por lo civil en el juzgado del Ayuntamiento de Sceaux el 26 de julio de 1895 y se fueron de viaje de novios a recorrer Francia en bicicleta. Marie Sklodowska, ahora Marie Curie, fue muy bien aceptada por la familia de Pierre, y la valoraban por su «inteligencia masculina» (Casado, 2007). Al iniciar su vida matrimonial se dispuso a continuar su carrera, prosiguiendo su estudio sobre los aceros. Las muestras de acero que necesitaba para estudiar las propiedades magnéticas en relación con su estructura físico-química se las proporcionaban gratuitamente diferentes empresas y la asesoría se la dio Henry Le Châtelier, el notable estudioso de las reacciones reversibles y su equilibrio (García, 2007, p. 29). El tema que estudiaba Marie, el magnetismo, tenía como guías a Le Châtelier (químico) y Pierre

Curie (físico), ambos excelentes en sus respectivos campos de estudio (figura 1).



Figura 1. Retrato de Marie Curie.

3. El mundo de la radiactividad natural: polonio y radio

Marie se atreve a estudiar un doctorado –fue la primera mujer en incursionar en estos terrenos–, de la mano de Wilhelm Conrad

Röntgen (quien ocupaba una cátedra en la Universidad de Würzburg) y Antoine Henri Becquerel (miembro de la Academia de Ciencias de Francia desde 1889). Se decidió por profundizar en el conocimiento del fenómeno que ella propuso como «radiactividad», ya que se trataba de la emisión de rayos activos, en el sentido de activar el depósito de plata en las placas fotográficas (figura 2). Realizó todos los experimentos de Becquerel. Al respecto, explica García (2007):

Obtuvo las muestras de sustancias metálicas de todos los conocidos que transitaban por la Escuela de Física y Química. Su investigación consistía en colocar la muestra sobre una placa metálica, colocar otra enfrente a modo de condensador y usar un electrómetro para detectar la presencia de cargas eléctricas en el aire entre las dos placas. (p. 40).



Figura 2. Radiografía de la mano de Frau Röntgen.

Probó con varias decenas de diferentes muestras, descubrió dos hechos de gran interés: las sales de torio se comportaban exactamente igual

que las de uranio y la intensidad de la radiactividad solo se relacionaba con las cantidades de sal radiactiva, de uranio o torio, empleada. Por tanto, se trataba de una propiedad del elemento, no de la sal que formaba; dependía de los átomos que tenían la propiedad.

Descubrió que si bien la intensidad de la radiación, medida con el electrómetro, era proporcional a la cantidad de sal pura del elemento radiactivo usado, la que medía en la pechblenda o la calcolita, antes de separar el uranio o el torio, era desproporcionadamente mayor; no correspondía a las cantidades de estos metales medidas en la muestra (figura 3). Esto le hizo pensar en la existencia de otro elemento radiactivo, desconocido, presente en la pechblenda o la calcolita, que se perdía durante el análisis. Al compartir esta hipótesis con Pierre Curie, este decide sumarse a la investigación usando toneladas de muestra.

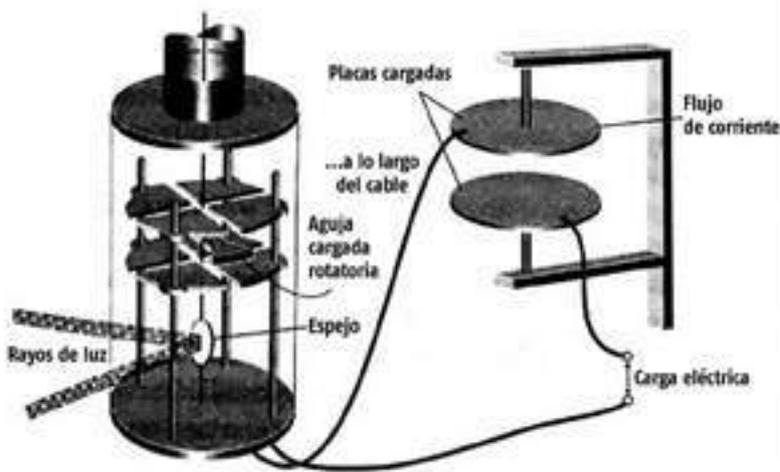


Figura 3. Una versión de un electrómetro utilizado por Curie.

Fundían la muestra en una vasija grande de hierro. Con la cooperación de la Academia de Ciencias de Viena y del gobierno austriaco, Pierre y Marie consiguieron una tonelada de desechos del mineral de pechblenda proveniente de las minas de San Joachimsthal, situadas en la región de Bohemia, Checoslovaquia. Con los desechos de ese mineral, Marie efectuó manipulaciones muy difíciles, pues en ocasiones manejaba hasta 20 kg de materia prima.

En palabras de Marie Curie: «A veces tenía que estar todo el día mezclando una masa en ebullición con una pesada barra de hierro casi tan grande como yo. Al final del día estaba muerta de cansancio» (Goldsmith, 2007, p. 183).

Los Curie lograron recuperar un décimo de gramo de cloruro de radio a partir de una tonelada de residuos de pechblenda. El proceso era tan laborioso que fue en 1902 cuando tuvieron la cantidad suficiente del elemento para determinar su masa atómica y otras propiedades.

En diciembre de 1897 iniciaron su investigación, a través de las técnicas químicas de análisis de la época. Pudieron aislar el elemento radiactivo que buscaban de todos los componentes de la mezcla original, excepto del bismuto (figura 4).



Figura 4. Colaboración de Marie y Pierre Curie en la búsqueda del elemento radiactivo.

El 6 de junio finalmente lo solucionaron ambos de manera diferente. En el caso de Marie, tomó una disolución de nitrato de bismuto que también contenía, según sus comentarios, el nitrato del huido elemento que buscaba, y pasó por esta una corriente de sulfuro de hidrógeno, obteniendo un precipitado. Recogió ese precipitado y midió su radiactividad: era 150 veces más radiactivo que el uranio, y anotó el registro en su cuadernillo entre 1897 y 1900 (figura 5).

De manera simultánea, Pierre colocó en un tubo de ensayo una muestra de sulfuro de bismuto impuro, el sólido precipitado al paso de sulfuro de hidrógeno, la calentó lentamente y de continuo, midiendo la temperatura en diferentes alturas del tubo. En la zona inferior, que era la más caliente, permaneció el sulfuro de bismuto, en las zonas cerca de la orilla del tubo (250 °C a 300 °C) se depositó otro polvo. Al recoger parte del polvo depositado en las zonas más frías del tubo y medir su radiactividad observó que era 300 veces superior a la del uranio.



Figura 5. Marie en su laboratorio obteniendo el precipitado radiactivo.

El 27 de junio de 1898 habían encontrado un nuevo elemento. Marie había elegido el nombre de «polonio» para el elemento recién nacido, en honor a su país. El polonio aislado como un sulfuro fue el primer elemento descubierto gracias a sus propiedades radiactivas.

Al continuar con sus investigaciones, los esposos Curie encontraron que la pechblenda contenía otro producto, con una actividad 900 veces más intensa que la del uranio y cuyas propiedades químicas eran completamente diferentes a las del polonio. La sorpresa fue que, después de aislar el polonio, registraron la existencia de otro elemento radiactivo, el cual nombraron «radio»; tenía toda la apariencia química del bario.

La asociación de los Curie era tan estrecha que a menudo es imposible separar sus respectivos papeles. Quizá el reflejo más preciso de quién hacía exactamente qué esté registrado en los cuadernos de laboratorio. Estos indican que en el momento de descubrir el radio (y el polonio) sus papeles eran casi intercambiables (Strathern, 1999) (figura 6).

Es importante también mencionar las penalidades de la vida científica de Marie Curie. Ella se lamentaba de que no hubiera ni dinero ni ayuda para el descubrimiento del radio: «La batalla por los medios para trabajar... La primera ayuda del estado llegó demasiado tarde». Sin mencionar ni a los científicos que ofrecieron su tiempo voluntariamente ni las ayudas y premios de instituciones científicas y de filántropos particulares, ni la inestimable ayuda de la fábrica en el tratamiento de los residuos de pechblenda, se describe a sí misma como «la conquistadora de metas inconquistables» (Strathern, 1999, p. 54).



Figura 6. Marie y Pierre en su laboratorio.

Gracias a los experimentos de Becquerel, Marie y Pierre Curie ya sabían que los elementos radiactivos y sus compuestos tenían la propiedad de ionizar el aire y así convertirlo en conductor de la electricidad. Además, que al colocar estos elementos en contacto con placas fotográficas sensibles, las velaban. Al medir esas propiedades, los esposos Curie encontraron que el polonio y el radio eran considerablemente más radiactivos que el uranio y el torio, pues sobre las placas fotográficas obtuvieron buenas impresiones con el radio y el polonio en medio minuto de contacto y necesitaron varias horas para obtener el mismo resultado con el uranio y el torio (Jiménez-Reyes y Bulbulian, 1994).

Otro acontecimiento importante para Marie fue que, al disolver la sal pura en más de quince cápsulas de porcelana en todos los rincones del laboratorio a la espera de su cristalización, al abrir la puerta en la oscuridad observó fascinada y sorprendida una suave luz que emitía el acompañante del bario desde el interior de cada una de las cápsulas, transformadas en lámparas. Los Curie, a partir de esta experiencia, anunciarían una nueva rama de la investigación de los fenómenos radiactivos, que en la primera mitad de nuestro siglo daría paso al descubrimiento y control de la energía nuclear.

Destacamos las condiciones en las que trabaja Marie Curie a través de sus propias palabras. Nos comenta que su laboratorio era un «miserable y viejo cobertizo». Y lo describe así:

Su tejado de vidrio no protegía totalmente de la lluvia; el calor era sofocante en verano y la estufa de hierro apenas aplacaba el frío glacial del invierno, salvo poniéndose junto a ella. No existía ninguna posibilidad de conseguir los instrumentos adecuados que utilizaban habitualmente los químicos. Teníamos simplemente unas viejas mesas de pino y unas calderas y quemadores de gas. Teníamos que utilizar el patio continuo para realizar las operaciones químicas que producían gases irritantes; e incluso en ese caso, el gas entraba a menudo en nuestro cobertizo. Con este equipo, iniciamos nuestro agotador trabajo. (Goldsmint, 2007, p. 183).

«En 1900 el joven químico André Debierne colaboró un tiempo con los Curie en el estudio de la radiactividad y sería en el futuro gran amigo de la pareja; André descubrirá otro elemento, el actinio» –relata Casado (2007, p. 170)–. El 28 de marzo de 1902 Marie anotó en su diario el peso atómico del radio: $Ra = 225,93$; el trabajo que había comenzado en 1898 después de cuatro largos años había terminado. Las

propiedades químicas del polonio eran semejantes a las del bismuto y, por tanto, fue colocado en la misma clasificación periódica. El radio, en cambio, quedaba asociado con el bario, por lo que se identificó como un elemento del grupo de los metales alcalinotérreos (figura 7).



Figura 7. Portada del primer número de *Le Radium* (enero de 1904).

Tras el descubrimiento de los dos nuevos elementos, los Curie siguieron trabajando codo a codo, pero en tareas diferentes. Marie hacía de química extrayendo el radio, mientras Pierre usaba la física para investigar la naturaleza de su radiactividad. Pierre realizó un experimento en el que la radiación radiactiva atravesaba un campo magnético. Halló que se separaba en tres tipos de rayos: alfa, beta y gamma, como pasaron a llamarse. A la vez que hacía este descubrimiento, simultáneamente lo hacían Becquerel y el científico de origen neozelandés Ernest Rutherford (quien les dio nombres a los rayos alfa

que eran positivos y los gamma neutros) (figura 8). Pierre Curie fue el que descubrió que los rayos beta tenían una carga negativa (Strathern, 1999). Ernest O. Rutherford llegó a ser amigo cercano de Marie.

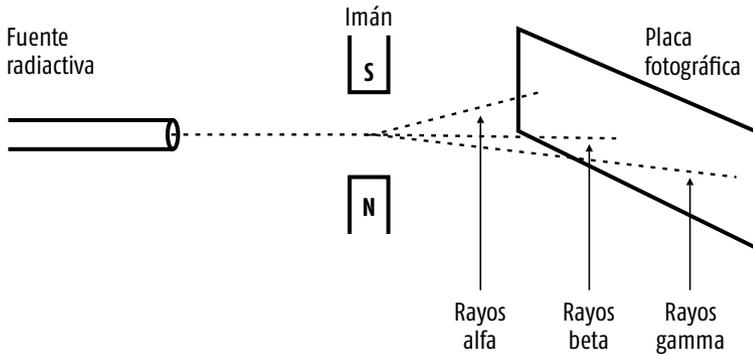


Figura 8. Hallazgo de los tres diferentes tipos de rayos: alfa, beta y gamma.

En 1900, Marie era profesora a tiempo parcial de la Escuela Normal Femenina de Sèvres, en las afueras de París (que no fuera un puesto a tiempo completo se debió solo en parte a la discriminación sexual), y en junio de 1903 obtuvo su doctorado, con la tesis intitulada: «Investigaciones sobre las sustancias radiactivas». Casado (2007) comenta:

Su trabajo era totalmente original; no se había hecho nunca, puesto que, al realizar la concentración de sales de plomo, estaba tratando con sustancias que eran invisibles por su mínima presencia. [...] Su trabajo no era uno más, sino de inmediato despertó un gran interés y fue muy reconocido. Empezó a recibir honores: primero la medalla de la Royal Society de Londres y muy poco después del Premio Nobel de Física en 1903. Era el primero que se concedía a una mujer, aunque en este caso era conjuntamente con su esposo. Su descubrimiento se ajustaba a la perfección a la filosofía de los Nobel: reconocer una investigación del año anterior a unos científicos jóvenes. (p. 171).

El 19 de abril de 1906 muere en un accidente Pierre Curie, y Marie completó la obra emprendida por ambos. Con admirable tenacidad continuó con sus investigaciones y tomó el lugar que había dejado Pierre tanto en su hogar como en La Sorbona, pues desde ese mismo año empezó a dar las cátedras que él impartía y así tuvo el honor de ser la

primera mujer profesora de esta universidad. Al principio tuvo el título de *professeur-adjoint*, pero en 1910 recibió finalmente el nombramiento de catedrática (*professeur titulaire*). Narra Strathern (1999):

El 5 de noviembre de 1906 Marie Curie subió al estrado para dar la primera clase impartida por una mujer en los seiscientos años de historia de la Soborna. Empezó sin preámbulos y retomando directamente las últimas palabras dichas por Pierre en su última clase, continuó con el mismo tema. Su voz era débil y monótona, pero la intensidad de su personalidad pronto cautivó a los asistentes. Alguien que estaba en la vanguardia científica estaba dando clases de ciencias avanzadas; las últimas noticias del frente. (p. 70) (figura 9).



Figura 9. Marie Curie al impartir su primera clase de física, tras la muerte de Pierre.

En el mismo año, Marie publicó su obra *Tratado de radiactividad* y en 1911 logró purificar aún más el radio, trabajo que requirió de mucho tiempo y habilidad (figura 10).

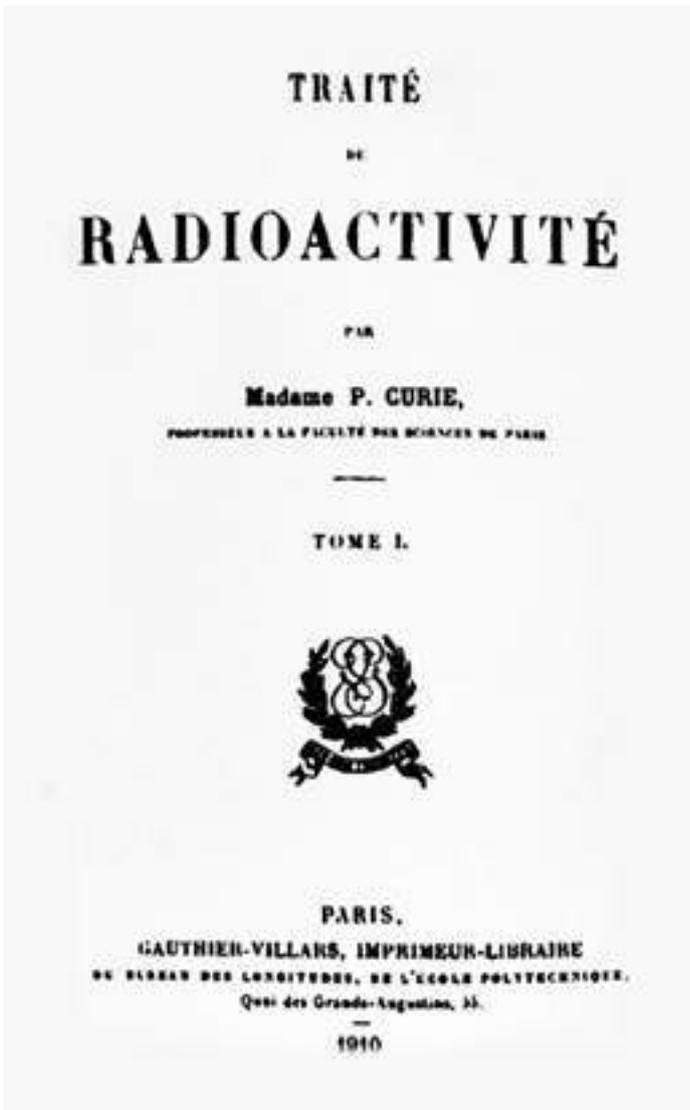


Figura 10. Portada del primer volumen del tratado sobre radiactividad de Marie Curie.

Le fue otorgado el Premio Nobel de Química «en reconocimiento a sus servicios al avance de la química con el descubrimiento de los elementos radio y polonio, el aislamiento del radio y el estudio de la naturaleza y compuestos de este extraordinario elemento», aunque «no lo obtuvo con

muchas propuestas: solamente dos (de Darboux y Arrhenius)» (Sánchez, 2000, p. 95). En la entrega de este premio Marie sí participó, y pronunció su conferencia Nobel un día después, el 11 de diciembre. Fue la suya una conferencia ritual profesional, en la que, naturalmente, no faltó una referencia a su esposo, que ya no podía acompañarla (Sánchez, 2000):

Antes de pasar al objeto de la conferencia, tengo que recordar que el descubrimiento del radio y del polonio fue realizado por Pierre Curie en colaboración conmigo. Se deben también a Pierre Curie en el dominio de la radiactividad estudios fundamentales que él realizó bien en solitario, bien conmigo, bien en colaboración con sus alumnos. El trabajo químico que tenía como meta aislar el radio al estado de sal pura y de caracterizarlo como un nuevo elemento, fue efectuado especialmente por mí, pero se encuentra íntimamente ligado a la obra en común. Creo interpretar exactamente el pensamiento de la Academia de Ciencias, aceptando que la alta distinción de que soy objeto está motivada por esta obra en común y constituye así un homenaje a la memoria de Pierre Curie. (Curie, 1912, pp. 2-3).

A lo largo de varios años, Marie luchó con ahínco por tener un laboratorio que respondiera a las necesidades de sus investigaciones. En 1914 se concluyó la construcción del Instituto del Radio de la Universidad de París, sin embargo, en ese mismo año estalló la Primera Guerra Mundial y la inauguración tuvo que esperar hasta el armisticio. Marie interrumpió su investigación del radio e inició una serie de experimentos que desembocaron en la fabricación de una máquina de rayos X portátil para hacer radiografías de los huesos de los heridos (una técnica muy similar a la actual de rayos X) (figura 11). Aprendió anatomía médica. Además, entregó casi todo el dinero de los Premios Nobel como préstamo de guerra para el Estado francés. Sobre este periodo narra Strathern (1999):

En 1916 Marie Curie ya dirigía un parque móvil de ambulancias y se había sacado el permiso para conducir para no tener que depender de un chófer. En ese mismo año su hija Irène, con dieciocho años, se unió a Marie, para ayudarla a dar lecciones de radiología al personal médico militar, lo cual les permitiría emplear los nuevos aparatos de rayos X en el frente sin que nadie les supervisara. Fue el comienzo de una colaboración entre madre e hija que duraría todo el resto de la vida de Marie Curie (p. 80) (figura 12).



Figura 11. Marie Curie al volante de su coche radiológico (octubre de 1917).



Figura 12. Marie, con la colaboración de su hija Irène, fue directora de radiología de la Cruz Roja francesa durante la primera guerra mundial.

Sobre este periodo narra Casado (2007): «Entre 1917 y 1918 se hicieron 1 100 000 radiografías. También se encargó de poner a salvo el gramo de radio que era su gran capital para la investigación. Protegido por 20 kg de plomo, lo depositó en un banco en Burdeos. Muchos otros científicos, como Langevin, también estaban al frente» (pp. 175-176).

Respecto a la relación de Marie con su hija Irène señala Goldsminth (2007): «La gran satisfacción en la vida de Marie parece que fue su estrecha relación de trabajo con Irène; decidió que después de su muerte, el control del Instituto Curie pasara a su hija Irène. Las dos compartían un interés desbordante por la ciencia» (p. 198).

La periodista estadounidense Mary Mattingley Meloney descubrió la gran preocupación de Marie Curie: la necesidad que tenía de radio para sus investigaciones. Estados Unidos contaba con 50 g, Meloney organizó una suscripción popular entre sus paisanos y consiguió reunir dinero para regalarle un gramo de radio. Marie lo fue a recoger a Nueva York con sus dos hijas (figura 13).



Figura 13. Madame Curie llega a la ciudad de Nueva York.

En mayo de 1921 el presidente Warren Harding le entregaba el regalo de su país en un cofre simbólico con una llave de oro. Ella lo aceptó con la condición de que el gramo no lo heredasen sus hijas, sino el laboratorio (figura 14).



Figura 14. Marie Curie del brazo del presidente Harding, encabezando el cortejo que descendía por las escaleras de la Casa Blanca (20 de mayo de 1921).

Marie también viajó a Varsovia para asistir a la colocación del primer ladrillo del Instituto del Radio, donde se trataría con radioterapia a los enfermos de cáncer; su hermana Bronia se encargó de organizar una suscripción popular por la que los polacos compraban «un ladrillo» para contribuir al proyecto. Pero también se necesitaba radio, por tal motivo Marie acudió una vez más a la periodista norteamericana, la señora Meloney, que volvió a pedir ayuda a los mecenas y al pueblo estadounidense. Marie regresa en un segundo viaje a Estados Unidos en 1929,

y en esta ocasión el presidente Herbert Hoover es quien le entrega, en un acto muy solemne en la Casa Blanca, el gramo de radio para Polonia, además de un valioso material de laboratorio. En 1932 regresa a Polonia para la inauguración del Instituto del Radio en Varsovia (Casado, 2007).

4. La radiactividad artificial: Irène y Frédéric Joliot

Gracias a los esfuerzos de Marie, Irène y Frédéric Joliot-Curie (figura 15) tenían casi dos gramos a su disposición en el Instituto Curie, de los que aislaron 200 milicurios de polonio, la fuente más poderosa de rayos alfa. Esta cantidad era mayor que la de cualquier otro laboratorio del mundo, y se decía que era diez veces más fuerte que el polonio alemán. Marie había pasado la estafeta a la siguiente generación y la había provisto de las sustancias que necesitaba para seguir explorando la radiactividad y el átomo aislado. Una vez más Francia y los Joliot-Curie tomaron la delantera; escribe Frédéric: «Tuvimos que acelerar el ritmo de los experimentos, pues da mucha rabia ser superado por otros laboratorios que en seguida reproducen los experimentos de uno» (Goldsmith, 2007, p. 191).



Figura 15. Frédéric Joliot e Irène Curie.

En enero de 1934 Irène y Frédéric Joliot-Curie hicieron el importante descubrimiento de la radiactividad artificial, continuación de la radiactividad inducida que descubriera Pierre Curie. Los Joliot-Curie hallaron que cuando el aluminio era sometido a cierto tipo de radiactividad (rayos alfa), era susceptible de retener una partícula alfa y emitir un neutrón. Esto lo hacía inestable y radiactivo, el aluminio se transformaba en un isótopo inestable del fósforo que, como resultado de las emisiones radiactivas, se desintegra progresivamente hasta convertirse en silicio, un elemento estable. Llegaron a una conclusión de enorme importancia: «los científicos, al crear o destruir elementos a su voluntad, serán capaces de producir transmutaciones de carácter explosivo» (Strathern, 1999, p. 86).

Los Joliot-Curie recibieron el Premio Nobel de Química en 1935 por su descubrimiento de la radiactividad artificial (figura 16).



Figura 16. Irène y Frédéric Joliot-Curie reciben el Premio Nobel en 1935 de la mano del rey Gustavo V de Suecia.

Marie siguió con su trabajo e investigaciones hasta el final de su vida con tenacidad y entusiasmo, a pesar de que sus problemas de salud

eran cada vez más graves; ya durante la primavera de 1934 no le fue posible asistir al laboratorio. Murió de leucemia (resultado de haberse expuesto en exceso a la radiación radiactiva) a mediados de ese mismo año, el 4 de julio de 1934 en Valence, Francia, a la edad de 66 años. «Sus parientes, amigos y compañeros de trabajo le acompañaron hasta su última morada, junto a la tumba de Pierre, en el cementerio de Sceaux» (Bulbulian, 1991, p. 21).

Conclusiones

Cada uno de nosotros debe trabajar para su propia mejora, y al mismo tiempo compartir una responsabilidad general para toda la humanidad.

MARIE CURIE

Marie Curie fue la pionera en abrir camino para la profesionalización de las mujeres, fue la primera en obtener el título superior de investigación concedida en Francia a una mujer en cualquier campo con su tesis doctoral. Recibió el Premio Nobel de Física y el Premio Nobel de Química (figura 17).



Figura 17. Marie Curie, científica cuya vida y obra han pasado a la posteridad.

La unidad de radiactividad, el curie, fue denominada así en homenaje a Marie, en uno de los Congresos Solvay efectuados en Bruselas (figura 18). Sin embargo, ella sufrió el rechazo de la Academia de Ciencias Francesa. La Academia se mantuvo masculinizada hasta 1966, año en que por primera vez se aceptó a una mujer como miembro. Ese honor fue para la discípula de Marie: Marguerite Perey, descubridora del francio en el laboratorio Curie del Instituto del Radio de la Universidad de París. Entre 1919 y 1934 fueron publicados 483 informes científicos provenientes del Instituto: 31 eran de Marie.



Figura 18. El Congreso Solvay, 1911.

Solo Marie Curie alcanzó, y además muy joven, la celebridad por su descubrimiento del radio, y tuvo sin reservas una espléndida vida científica. Además de sus notables contribuciones a la física, generó con su propia vida un modelo de hacer ciencia, honesta e independiente, e incluso luchó porque la investigación tuviese unos recursos y un lugar digno en la sociedad, lo que ha trascendido hasta la actualidad. Marie es la muestra excepcional que rompió la barrera infranqueable de la invisibilidad como mujer. Pocas pudieron recibir, como ella, el reconocimiento junto con los frutos de su laboratorio o de su trabajo de campo, que a lo largo de los siglos ha sido fértil en muchas áreas. Marie coincide con otras investigadoras en que la ciencia no es solo algo intelectual, sino también algo emocional y divertido: «Soy de los que piensan que la ciencia tiene una gran belleza. Un sabio en su laboratorio no es solo un teórico. También es un niño colocado ante los fenómenos naturales que le impresionan como un cuento de hadas. No pensemos que todo el

progreso científico se limita a mecanismos, máquinas y engranajes... Si veo a mi alrededor algo vital es precisamente este espíritu de aventura... emparentado con la curiosidad» (Casado, 2007, pp. 19 y 181).



Figura 19. Marie Curie (American Institute of Physics).

Marie es una figura científica mundialmente famosa para todas las generaciones. Se convirtió en el emblema de una mujer empoderada e independiente. Es y seguirá siendo una fuente de inspiración para todas las mujeres que desean incursionar en el ámbito científico.

Refiere Casado (2007):

La periodista estadounidense Mary Mattingley Meloney se quedó desarmada ante la sencillez de la científica y su gran calidad como ser humano. [...] Marie viaja con frecuencia para asistir a congresos, visitar laboratorios y también visitar fábricas. La reclamaban en todas partes. Exponiendo sus descubrimientos, pero también defendiendo los derechos de los científicos, por este motivo la

nombraron vicepresidenta del Comité en Defensa de estos derechos. Luchó públicamente por establecer unas normas científicas que ayudaran en el trabajo de investigación, como unificar los símbolos y la terminología. (p. 177).

En espera de que un día existiera una mejor forma de proceder dentro de la ciencia, expresó Marie Curie:

La humanidad necesita ciertamente hombres prácticos que saquen el máximo partido a su trabajo en aras de sus propios intereses, sin olvidar necesariamente el interés general. Pero también necesita soñadores, para quienes la búsqueda desinteresada de un fin sea tan imperiosa que les resulte imposible dedicar mucha atención a sus intereses materiales. Se dirá sin duda alguna que estos idealistas no merecen riquezas, puesto que no las desean. Pero una sociedad bien organizada podría garantizar una necesidad que es esencial para ellos: los medios para realizar un trabajo eficiente en una vida en la que no cupieran las preocupaciones materiales, para que esta vida pudiera dedicarse sin cortapisas al servicio de la investigación científica. (Goldsmith, 2007, p. 184).

El legado de Marie Curie, tanto científico como social, ha sido un punto de inflexión en la historia de la física y de la humanidad, así como motivo de inspiración para la juventud que se interesa y se apasiona por la ciencia. Es imprescindible recordar su natalicio cada 7 de noviembre; sus valiosas contribuciones, su tenacidad, valentía, coraje y pasión serán recordadas hoy y siempre.

Bibliografía

- AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS (s. f.): «Marie Curie Student in Paris 1891-1897. Part 1», College Park, Maryland.
- BULBULIAN, S. (1991): *La Radiactividad*, colección *La ciencia desde México*, n.º 42, México D. F.: Fondo de Cultura Económica. Segunda reimpresión.
- CASADO RUIZ, M. (2007): *Las damas del laboratorio. Mujeres científicas en la historia*. Barcelona: Editorial Debate.
- CURIE, M. (1912): «Conférence Nobel», en *Les Prix Nobel en 1911*, Estocolmo: Imprimerie Royale, P.A. Norstedt & Döner, pp. 1-12.
- GARCÍA, H. (2007): *Marie Curie. La cacería de lo inestable*, México D. F.: Editorial Pax.

- GOLDSMINTH, B. (2007): *Marie Curie, genio obsesivo*, Barcelona: Antonio Boch Editor.
- JIMÉNEZ-REYES, M. y S. BULBULIAN (1994): «El descubrimiento de la radiactividad natural», en P. Bosh *et al.*, *Pioneros de las ciencias nucleares*, colección *La ciencia desde México*, n.º 120, México D. F.: Fondo de Cultura Económica.
- JOLIOT-CURIE, I. (1963): «Marie Curie, ma mère», *Cotton*, pp. 244-249. Originalmente publicado en *Revue Europe*, n.º 108, diciembre, pp. 89-121.
- JOLIOT-CURIE, I. (ed.) (1954): *Oeuvres de Marie Sklodowska Curie*, Varsovia: Panstwowe Wydawnictwo Naukowe.
- SÁNCHEZ, J. (2000): *Marie Curie y su tiempo*, Barcelona: Crítica.
- STRATHERN, P. (1999): *Curie y la radiactividad*, colección *Los científicos y sus descubrimientos*, Madrid: Editorial Siglo XXI.



Modelo teórico del movimiento de un aerogenerador desde el punto de vista mecánico

DAMIÁN CANELLES GÓMEZ,* OCTAVIO CALZADILLA,*
JULIO VIDAL*

Introducción

Todos los años se emiten alrededor de veintinueve mil millones de toneladas de dióxido de carbono a nuestra atmósfera debido al uso de combustibles fósiles; en medio de este proceso de degradación es imprescindible enfocarnos en el desarrollo de nuevas fuentes de energía más limpias y renovables. Dos de las más utilizadas son la energía eólica y la energía solar. La energía eólica se basa en la generación de energía eléctrica a partir del movimiento del viento y ha aumentado su popularidad en las últimas décadas debido a los nuevos modelos de aerogeneradores de eje rápido. Como las otras energías renovables, esta tiene su origen en el Sol, pues debido a la influencia de su radiación, la forma de la tierra y su movimiento de traslación y rotación, se crean zonas de distintas presiones atmosféricas, lo cual provoca corrientes de viento.

La energía eólica es famosa no solo por ser limpia, sino también porque es eficiente; las zonas de funcionamiento de los aerogeneradores son aprovechables para todo tipo de actividades, estos no generan contaminación acústica ni afectan la vida de las especies de animales que coexisten con ellos. Cada kWh generado con energías limpias representa 867g de dióxido de carbono que no son emitidos a la atmósfera. El movimiento de las aspas de los aerogeneradores es un magnífico ejemplo de cómo se aplican las leyes de la mecánica a un proceso concreto de la vida. El viento, al incidir sobre las aspas, actúa como una fuerza y hace que estas comiencen a moverse en su

* Facultad de Física, Universidad de La Habana, Cuba.

dirección, pero al mismo tiempo ese movimiento crea una interacción permanente con las moléculas de aire que van encontrando a su paso, y esta se puede analizar como una fuerza de fricción.

Se muestra en el trabajo cómo el aerogenerador sometido a la acción de ambas fuerzas alcanza una velocidad estable que depende de factores tales como la densidad y la velocidad del aire.

Desarrollo

1. Funcionamiento de un aerogenerador

La figura 1 muestra el funcionamiento de un aerogenerador.

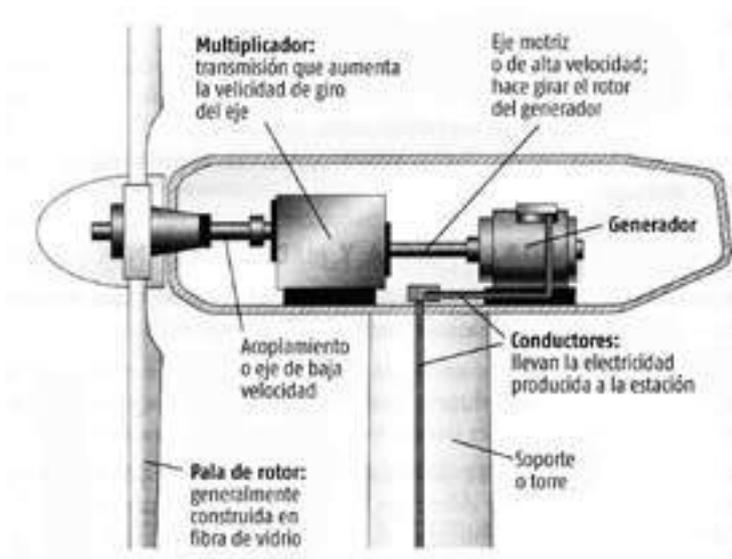


Figura 1. Esquema básico de la composición de un aerogenerador.

Fuente: <<http://www.tecnicasei.com>>

2. Análisis teórico del funcionamiento del aerogenerador

El choque del aire con la superficie de las paletas debido a su inclinación ejerce una fuerza en el sentido de esta inclinación, lo que hace que el aerogenerador comience a girar. El movimiento de las aspas se transmite por el eje al generador y comienza la generación de electricidad. A su vez, el movimiento de rotación genera una fuerza de resistencia debida al choque de las paletas con las moléculas de aire que se encontraban en reposo entre ellas (figuras 2 y 3).

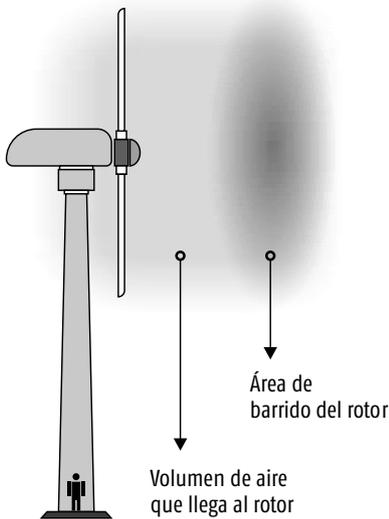
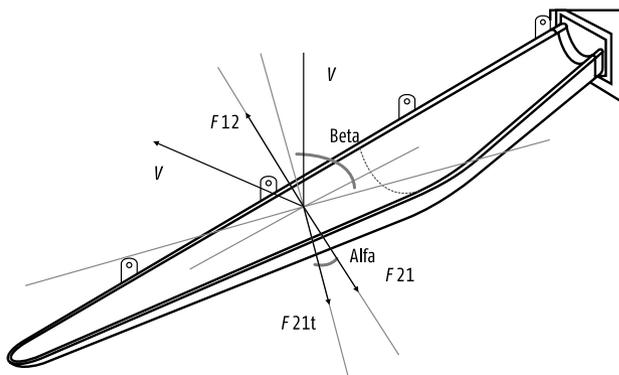


Figura 2. El aire que pasa por la superficie de barrido de las aspas las hace girar. El choque de estas con el aire en reposo entre ellas las frena.

Fuente: <www.iberdrola.com>.



LEYENDA

V - Velocidad inicial y final de las moléculas de aire
 Beta - Ángulo de inclinación de V respecto a la superficie de las aspas
 F_{12} - Fuerza normal que provoca la variación de sentido de la velocidad V

F_{21} - Par de acción y reacción de F_{12}
 Alfa - Ángulo de inclinación de F_{21} con el eje tangencial al brazo medido desde el eje de rotación
 F_{21t} - Componente de F_{21} en el sentido tangencial al brazo

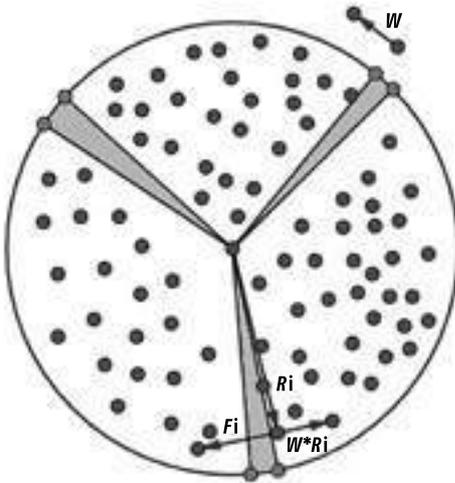
Figura 3. Interacción de la molécula de aire con la superficie frontal del asa.

A continuación llevaremos a cabo la formulación matemática de lo expresado anteriormente. Analizaremos en primera instancia la fuerza que actúa sobre un punto de las aspas, que consideraremos como una partícula del sólido, debido al choque frontal con el aire.

Sea V_t la componente de la velocidad en el eje de la normal. Dada la forma cóncava de las paletas, la velocidad del viento tiene una componente, que es perpendicular al eje, la que, teniendo en cuenta que las paletas están rígidamente unidas a este, lo hace girar y con él al rotor.

Utilizando la segunda ley de Newton $F_i = m_i dv_i / dt$, e integrando posteriormente entre 0 y t y entre $-V_t$ y V_p , debido a que en un sistema de referencia en reposo ubicado en la superficie del asa la velocidad tangencial de la partícula cambia de sentido, obtenemos la ecuación (1). Luego analizamos el par de acción-reacción de esta fuerza F_{21} y su descomposición sobre el eje tangencial al brazo sea F_{21t} y obtenemos la ecuación (2).

Ahora analizaremos la fuerza ejercida sobre las partículas del asa debido al choque con las moléculas que se encuentran entre las aspas (figura 4).



LEYENDA

W - Velocidad angular de rotación de las aspas
 F_i - Fuerza que provoca la variación de la velocidad de la molécula de aire

R_i - Radio vector de cada molécula de aire
 $W * R_i$ - Velocidad de la molécula de aire en un sistema de referencia en el que las aspas están en reposo

Figura 4. Interacción de la molécula de aire con la superficie lateral del asa.

Considerando que U_t es la velocidad de las moléculas del aire en un sistema de referencia en que las aspas están en reposo y que todas las moléculas tienen la misma velocidad, tenemos que, si se utiliza la segunda ley de Newton, $F_i = m_i dv / dt$, integrando de la misma manera que anteriormente de 0 a t y de $-U_t$ a U_t , se obtiene la ecuación (3).

Aplicando la segunda ley de Newton para la dinámica de la rotación llegamos a (4). Asumiendo que existe solo una diferencia finita entre la cantidad de partículas que componen la superficie del sólido y la cantidad de moléculas de aire que chocan contra ella, se puede convertir la sumatoria en una integral, y por el teorema del valor medio se puede encontrar un R_{f1} y un R_{f2} , de forma tal que obtenemos (5).

Siendo n_1 y n_2 la cantidad de moléculas que chocan con la superficie frontal y lateral de las aspas. Luego analizamos un infinitesimal de volumen en la superficie de contacto y, siendo ρ la densidad del aire, m_1 la masa de una molécula, s_1 la superficie frontal del aspa, s_2 la superficie lateral del aspa y R_{max} el mayor de los radios de la superficie lateral, se obtiene (6).

Para abreviar el tamaño de las ecuaciones definimos (7) y (8). Luego, separando los diferenciales e integrando desde 0 a t y de W_0 a W , llegamos a (9). Al cabo de un tiempo, teniendo en cuenta que F_{12} es constante y F_1 varía con W , que varía con el tiempo, y que ambas tienen sentidos contrarios, se alcanza un punto en que estas fuerzas se igualan y el sistema comienza a moverse a W constante.

Ahora llevaremos a cabo el análisis teórico de esta W . Utilizando la segunda ley de Newton en el punto anteriormente descrito obtenemos (10). Luego, realizando un proceso similar al usado anteriormente para calcular las sumatorias y las cantidades de partículas que chocan y despejando, obtenemos (11), que sería la expresión para esta W estacionaria (figura 5).

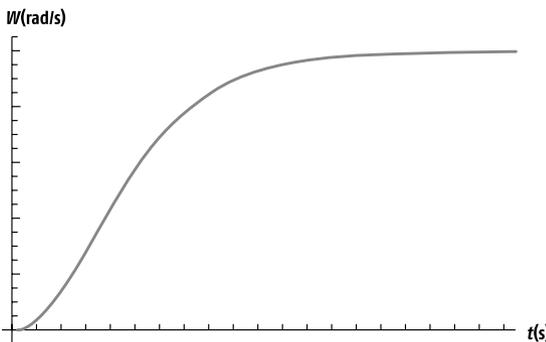


Figura 5. Gráfica aproximada de la función de $W = f(t)$.

3. Ecuaciones

$$F_{12} = \frac{2 m_i V \sin(\text{Beta})}{\tau} \tag{1}$$

$$F_{21t} = \frac{2 m_i V \sin(\text{Beta}) \cos(\text{Alfa})}{\tau} \tag{2}$$

$$F_i = \frac{2 m_i W R_i}{\tau} \tag{3}$$

$$\frac{2 m_i V \sin(\text{Beta}) \cos(\text{Alfa})}{\tau} \sum_{i=0}^{n_1} R_i - \frac{2 m_i W}{\tau} \sum_{i=0}^{n_2} R_i^2 = I \frac{dW}{dt} \tag{4}$$

$$\frac{2 m_i V \sin(\text{Beta}) \cos(\text{Alfa}) R_{f1} n_1}{\tau} - \frac{2 m_i W R_{f2}^2 n_2}{\tau} = I \frac{dW}{dt} \tag{5}$$

$$2 V^2 \sin(\text{Beta})^2 \cos(\text{Alfa}) R_{f1} \rho S_1 - 2 R_{f2}^2 \rho S_2 W^2 R_{\max} = I \frac{dW}{dt} \tag{6}$$

$$K_1 = \frac{R_{f2}^2 S_2 R_{\max}}{V^2 \sin(\text{Beta})^2 \cos(\text{Alfa}) R_{f1} S_1} \tag{7}$$

$$K_2 = 2 R_{f2} V \rho \sin(\text{Beta}) *$$

$$\sqrt[2]{S_2 \cos(\text{Alfa}) R_{f1} S_1 R_{\max}} \tag{8}$$

$$W = \frac{\tanh \left[\frac{K_2 t}{I} + \tanh^{-1} \left(\sqrt[2]{K_1 W_0} \right) \right]}{\sqrt[2]{K_1}} \tag{9}$$

$$\sum_{i=0}^{n_1} R_i \times F_{21t} = \sum_{i=0}^{n_2} R_i \times F_i \tag{10}$$

$$W = \frac{V \sin(\text{Beta})}{R_{f2}} \sqrt[2]{\frac{\cos(\text{Alfa}) R_{f1} S_1}{S_2 R_{\max}}} \tag{11}$$

Conclusiones

Este trabajo no solo nos mostró la importancia de la energía eólica como forma de energía renovable, sino también la posibilidad de realizar aplicaciones de la mecánica aprendida en el curso regular de primer año de

la Facultad de Física, lo que representa un estímulo para los estudiantes, además del vínculo que se establece con el uso de fuentes más limpias de energía.

Bibliografía

ARRASTÍA ÁVILA, M. A. (2010): «Electricidad y emisiones de CO_2 », La Habana: *Juventud Rebelde*.

RESNICK, R. y D. HALLIDAY (1999): *Física General I*, México D. F.: Compañía Editorial Continental. Novena reimpresión.



Fórmulas *versus* comprensión de la física; la epistemología al rescate

DIEGO DE JESÚS ALAMINO ORTEGA,* YENILE AGUILAR
RODRÍGUEZ*

Introducción

La atención a los problemas del proceso de enseñanza-aprendizaje de las ciencias es concomitante con su introducción en los currículos escolares, pero, según señala Gil (1994), estas cobraron un real auge desde mediados del siglo pasado, y fundamentalmente a partir de la década de los 80.

En el caso de la enseñanza de la Física en Cuba, se ha manifestado un interés creciente al crearse grupos en universidades que trabajan en Didáctica de la Física, lo que ha permitido la defensa exitosa de tesis de maestría y doctorado; de manera sistemática se realizan eventos para el intercambio y la comunicación internacional, y se hace anualmente un número significativo de publicaciones (Gil *et al.*, 1996).

La enseñanza de la Física en Cuba comienza desde que en la asignatura Ciencias Naturales, en el nivel primario, se incluyen elementos de esta ciencia, pero alcanza nivel de sistematicidad cuando en el octavo grado de secundaria básica (12-13 años) se imparte la Física como asignatura y se cierra el ciclo en el duodécimo grado (17-18 años) del preuniversitario.

De este modo, el estudiante que ingresa a carreras universitarias ha transitado por cinco cursos anuales de Física. Según el fin de la enseñanza de la asignatura en el preuniversitario, esta pretende lograr la ampliación, aplicación y profundización en el estudio de las propiedades y el comportamiento de la materia y la energía (como

* Departamento de Formación del Profesional, Centro Universitario Enrique Rodríguez-Loeches Fernández, Universidad de Matanzas, Cuba.

también cualquier cambio en ella que no altere su naturaleza), así como el tiempo, el espacio y las interacciones de estos cuatro conceptos entre sí (Ministerio de Educación, 2016). No obstante, lo que se observa en los estudiantes no es una real comprensión de propiedades y el comportamiento de la materia, sino que el conocimiento de la Física queda a nivel reproductivo, cuando no pasa inadvertido; y en cuanto a aplicaciones, persiste la tendencia a la solución de problemas en forma algorítmica.

Las causas de lo anterior pueden resultar múltiples, una de ellas es que la Física se enseña y se evalúa para que el estudiante sea reproductivo (Pozo y Gómez, 2010); luego, para lograr un cambio en la forma pragmática, utilitaria y funcional en que se concibe la asignatura, nos hemos propuesto integrar al proceso de enseñanza-aprendizaje de la Física la historia y la epistemología, lo que puede contribuir a la comprensión de conceptos, hechos, fenómenos, leyes y principios, así como a establecer la conexión de la física con los acontecimientos sociales, culturales, religiosos y de concepción del mundo, con los cuales está imbricada, para que de este modo pase a formar parte de la cultura general del estudiante.

Desarrollo

A los docentes universitarios de Física y también a los de otros niveles educacionales se les oye con reiteración quejarse del bajo aprovechamiento que logran los estudiantes, la falta de interés en la asignatura, expresada en la pregunta «¿para qué me sirve?», y la posición pragmática que los lleva a exigir que se les den resúmenes de conceptos para aprenderlos de memoria y sobre todo de las «fórmulas» más importantes, al punto que llegan a identificar la complejidad de la asignatura con el número de fórmulas. En algunas oportunidades los profesores, ante tales manifestaciones, acceden a las peticiones de los estudiantes y entonces la Física se aprende como un sermón, de forma tal que si falta una palabra se pierde la significación de la «oración» (el concepto) (Matthews, 1992; Sinarcas y Solbes, 2013; Alamino y Aguilar, 2018).

1. Comprender la Física

Como una conceptualización de trabajo, consideramos que comprender la Física significa que, una vez cursada la asignatura, el estudiante posea en primera aproximación la capacidad de comunicar a otros los conceptos fundamentales, hechos, fenómenos, leyes, y principios, y además

relacionarlos con situaciones de la realidad. Esto debe lograrse una vez recibido el ciclo de asignaturas de Física o en cada una de las etapas en que se concluye con las partes en que se ha dividido para su enseñanza, que fundamentalmente se corresponden con las formas de movimiento de la materia, empezando por el movimiento mecánico.

Para valorar la comprensión de la Física lograda en niveles precedentes, antes de recibir la asignatura en la universidad, se han realizado encuestas en grupos de estudiantes a los que hemos tenido la oportunidad de impartirles clases. Una muestra de las encuestas se presenta en las tablas I y II, con los resultados obtenidos.

Tabla 1. Encuesta aplicada a estudiantes del grupo 2A

A LAS AFIRMACIONES RESPONDER SÍ O NO	CORRECTAS
1. Un cuerpo puede estar en movimiento sin que sobre él actúe una fuerza.	69,23 %
2. El calor que contiene un cuerpo se trasmite a los cuerpos fríos.	38,46 %
3. Los paneles solares convierten la luz en calor para producir energía eléctrica en sustitución del petróleo.	7,69 %
4. Los hornos de microondas cocinan gracias a la inducción electromagnética.	30,76 %
5. La fotosíntesis necesita de altas temperatura para que ocurra.	84,61 %
6. El agua es absorbida por las plantas gracias a la capilaridad.	61,53 %
7. Para determinar el contenido de azúcar en la caña se emplea un equipo que usa la polarización de la luz.	38,46 %
Total de preguntas: 91. Correctas: 43. Incorrectas: 48.	47,25 %

Tabla 2. Encuesta aplicada a estudiantes del grupo 1A

A LAS AFIRMACIONES RESPONDER SÍ O NO	CORRECTAS
1. Para que un cuerpo se mueva es necesario que sobre él actúe una fuerza.	76,47 %
2. El calor es una sustancia que se trasmite de los cuerpos calientes a los fríos.	5,8 %
3. En los paneles solares se convierte el calor del Sol en energía eléctrica.	11,76 %
4. El horno de microondas cocina al emitir ondas sonoras no audibles al oído humano.	11,76 %
5. El proceso de la fotosíntesis puede ocurrir en ausencia de luz.	88,23 %
6. La capilaridad es el mecanismo mediante el cual se trasmite el agua a través de los sistemas de riego.	47,05 %
7. El método de polarización de la luz sirve para determinar la pureza de los jugos de la caña de azúcar.	41,17 %
Total de preguntas: 119. Correctas: 48. Incorrectas: 71.	40,33 %

Se puede apreciar que en las preguntas de los dos grupos hay cierta simetría en los ítems. Se comienza con la interpretación de la primera ley de la mecánica newtoniana, esencial en la comprensión del

movimiento mecánico. Llevó mucho tiempo a la comunidad científica, desde Aristóteles a Galileo, llegar a la conclusión de que tan natural es el estado de reposo como el de movimiento rectilíneo uniforme.

En el segundo ítem, que aborda el concepto de calor, se trata de que el estudiante diferencie este concepto del de calórico, como sustancia contenida en los cuerpos, asumido en la época de los imponderables; y de que además revele la direccionalidad de la transmisión de la energía expresada en la segunda ley de la termodinámica.

El tercer ítem, al igual que el quinto, pretende que el estudiante reconozca la transmisión de la energía luminosa en porciones discretas (fotones) y su conversión en energía eléctrica en los paneles solares o como suministro energético a las plantas; como se trata de estudiantes de Agronomía, se le incluye lo relacionado con la fotosíntesis, y además se identifica la conversión en los paneles solares como fuente alternativa de energía.

Se procura en el número cuatro que se diferencien fenómenos tales como inducción electromagnética, ondas electromagnéticas y ondas sonoras; el conocimiento de la inducción electromagnética tiene una connotación actual en Cuba al introducirse masivamente con el Programa de Ahorro de Electricidad el uso de las cocinas de inducción.

Al igual que la fotosíntesis, la capilaridad es un fenómeno que está muy relacionado con la nutrición de las plantas y es un caso muy específico del movimiento de fluidos; luego, en el ítem seis, se incluye para que sea identificado por los estudiantes. Finalmente, un fenómeno propio de las ondas transversales y en particular de la luz: la polarización, se pone a consideración de los estudiantes y se le relaciona con la carrera seleccionada.

Como se puede apreciar, los resultados obtenidos en esta simple medición, en cuanto a respuestas correctas, son muy bajos: 47,25 % y 40,33 %, lo que hace que en general menos del 50 % de los estudiantes tengan una comprensión acertada de los aspectos de la física que se les han presentado.

2. El proceder algorítmico en la resolución de problemas

Tradicionalmente la enseñanza de Física se ha basado en que los estudiantes aprendan a resolver problemas. Según esta práctica, se evalúa la asignatura a través de la resolución de problemas muy similares a los que estos han solucionado antes. En muchas oportunidades el enunciado sugiere los datos, al decir «un cuerpo de masa 5 kg», o con

«velocidad de 6 m/s», y como el estudiante memoriza la fórmula o ecuación, sustituye en ella y ya está resuelto el problema.

En un ejercicio que desarrollamos se le pidió a un profesor de preuniversitario que había impartido a sus estudiantes Mecánica y los había examinado tres meses antes, que resolviera en la pizarra un problema de dinámica de la traslación: a un cuerpo apoyado en una superficie horizontal rugosa se le aplicaba una fuerza formando ángulo con la horizontal y se calculaba la aceleración del cuerpo. Se numeraron determinados pasos en la resolución del problema y se le pidió a los estudiantes que en la solución mostrada en la pizarra identificaran dónde se aplicaba cada una de las leyes de Newton. Los pasos que se les enumeró fueron:

1. Diagrama de fuerzas o cuerpo libre.
2. Descomposición de fuerzas según el sistema de referencia.
3. Sumatoria de fuerzas para cada uno de los ejes coordenados según el sistema de referencia.
4. Relación $f_r = \mu N$

El quinto y los demás pasos, eran de operatoria matemática.

Solo cuatro estudiantes asociaron correctamente la tercera ley con el paso 1, y ocho adjudicaron la segunda ley al paso 3; las demás respuestas fueron erradas: hubo quiénes colocaron la segunda ley en todos o la mayoría de los pasos del problema, al igual que la tercera, y muchos asociaron la operatoria matemática a las leyes de Newton.

Su reacción antes de comenzar este ejercicio consistió en expresar que si se les hubiera exigido resolver el problema lo hubieran hecho, pero no lograron identificar las leyes de Newton en su solución, lo que pone de manifiesto que sin conocer estas leyes pueden solucionar el problema, siguiendo un procedimiento algorítmico.

3. La historia y la epistemología al rescate

Hay consenso en la comunidad de educadores, aunque no unanimidad, de que la historia y la epistemología en la enseñanza de la ciencia pueden contribuir a humanizarla, poniéndola en conexión con la ética, la política, con las actitudes personales de los científicos. Pueden hacer las clases más atractivas, profundas, y se reforzaría el pensamiento crítico; mejoraría la comprensión de los hechos, conceptos y leyes, en contraposición a la recitación de fórmulas y ecuaciones, que a la postre son poco comprendidas. Esta integración puede mejorar la actuación

del docente ayudado por el desarrollo del enfoque epistemológico de la ciencia, que lleva a una mayor comprensión de su estructura y su lugar (Matthews, 1992).

Una muestra de lo anterior se puede apreciar en un experimento docente que realizamos en una escuela secundaria básica, donde se tomaron dos grupos escolares de octavo grado, uno de muestra y otro de control, a los que, previamente diagnosticados y seleccionados al azar, se les impartió la Física: al grupo de control, por el método tradicional y al experimental, a través de un hilo conductor histórico, incluyendo elementos de la epistemología de la física mediante un sistema de tareas docentes. El contenido seleccionado para el experimento fue el de dos unidades del curso escolar, la primera referida al movimiento mecánico y la segunda, a temperatura y calor.

Los resultados fueron medidos a través de encuestas de salida y de la propia prueba parcial del curso. Estos evidenciaron una mayor calidad en las respuestas de los estudiantes del grupo experimental, dada por una mejor comprensión del contenido desde el punto de vista teórico, práctico y experimental, lo que elevó el porcentaje de promoción y la calidad de las calificaciones con respecto al grupo de control.

Aunque un experimento como el anterior no permite verificar absolutamente nuestra hipótesis sobre lo positivo que resulta para la enseñanza de las ciencias integrar a ella la historia y la epistemología, hemos realizado otros experimentos similares con iguales resultados. Solbes y Traver (2001), en un experimento a mayor escala, en el cual durante un año introdujeron en sus clases aspectos de historia y sociología de la ciencia, con estudiantes de entre 15 y 17 años y con varios grupos, reportan que la introducción de ambas en clases puede mejorar significativamente la actitud de los estudiantes hacia la ciencia.

Con el fin de detectar en el profesorado de Física de preuniversitario el estado actual de la inclusión de la historia y la epistemología de la ciencia en el proceso de enseñanza-aprendizaje de la asignatura, se realizó una encuesta a nueve graduados de las carreras de Educación en Física que se encuentran en ejercicio, atendiendo a las siguientes dimensiones: conocimiento sobre la ciencia, vinculación de la historia de la física a las clases de Física, y tratamiento a la didáctica de la Física.

Las regularidades obtenidas a partir de los indicadores medidos permitieron concluir en la primera dimensión que el 100 % de los encuestados refieren desconocimiento de los elementos funda-

mentales que caracterizan a la ciencia en su conceptualización. Sin embargo, los docentes concuerdan en que es importante el conocimiento de la historia de la física y consideran que esta posibilitaría la comprensión de la Física. Se sienten preocupados por el incumplimiento del programa de la asignatura que significaría emplear los elementos históricos en las clases, y a la vez declaran todos que no están preparados para asumirla impartiendo los contenidos con la inclusión de la historia y la epistemología, por lo que solicitan que se les prepare.

En cuanto a la resolución de problemas, plantean que los estudiantes aprenderían mejor la teoría para ser aplicada a la resolución de problemas y estos no se reducirían solo a las matemáticas, aludiendo a la importancia que requiere el análisis físico. Expresan que para la introducción de la historia de la física son insuficientes los datos sobre los científicos en los textos de física y que el uso de otros textos ayudaría a profesores y estudiantes a prepararse mejor; aflora el componente motivacional y la formación de valores morales.

Declaran los encuestados que desde los objetivos del programa de la asignatura hay elementos que para cumplirlos es necesario hacer alusión a la historia de la física, pero que en las orientaciones metodológicas no aparecen acciones que indiquen cómo hacerlo. No conocen el significado de la palabra epistemología y existe un 88,88 % que no la había escuchado mencionar.

Un análisis de lo anterior indica que existen opiniones en los docentes que reconocen la necesidad de emplear la historia de la física en su enseñanza, lo que en cierto modo se encuentra en las exigencias de los objetivos del programa, a pesar de que se evidencian imprecisiones en la comprensión de aspectos relacionados con el conocimiento de la historia, la epistemología y el método científico.

Algunos planteamientos refieren que las orientaciones metodológicas no declaran acciones metodológicas para realizar tal integración. Estas serían importantes para motivar a los estudiantes hacia la Física y enriquecer su cultura general a partir de la formación de una concepción científica del mundo mediante el conocimiento de la evolución de los acontecimientos científicos en el desarrollo de la ciencia. Además, la educación en valores morales sería una estrategia formativa que estaría autocontenida, pues la enseñanza no debe limitarse a la instrucción, sino al sentir y actuar en correspondencia con el contexto histórico.

4. Acciones metodológicas

Las acciones metodológicas dirigidas a subvertir el estado actual que se ha descrito como resultado de una práctica tradicional se han desarrollado a través de reuniones metodológicas y de preparación a profesores que se desempeñan en las educaciones media básica y media superior, incluyendo algunos de la educación superior. También se han instrumentado cursos de posgrado: «La historia de la física y su vinculación a la enseñanza», «Educación y cultura científica en la escuela», «La física, su historia y contemporaneidad» e «Historia, filosofía y metodología del conocimiento científico».

En estas actividades realizadas con los profesores se ha partido de presupuestos tales como:

- La ciencia es considerada como un proceso progresivo y abierto que no aspira al establecimiento de verdades terminadas en diferentes momentos parciales de desarrollo.
- De acuerdo con la filosofía marxista-leninista, la epistemología se refiere a la teoría del conocimiento y, por ello, no puede estar ajena a las teorías educativas. La valoración epistemológica del conocimiento científico ayuda a la fundamentación científica de la ciencia, y la educación que se ofrece en la escuela guarda relación con la visión de la ciencia que puedan tener los docentes y que llegarán a conformarse los estudiantes, así como la concepción acerca de la naturaleza.
- Se debe lograr que el estudiante transite en su proceso cognoscitivo por las etapas que atravesó la ciencia, que pueda apropiarse de un pensamiento lógico-dialéctico que le permita crear, guiado por el docente, y adquirir más tarde su propio sistema cognoscitivo, poniendo de manifiesto una actitud crítica.
- Además, se ha tenido a bien observar determinadas advertencias, una de ellas proveniente del sacerdote cubano, filósofo y maestro de ciencias Félix Varela, de quien se ha dicho que «nos enseñó en pensar primero». Apegado a la concepción de la filosofía electiva, que promulga: ningún método, todos los métodos, en 1837 denunciaba «el plan puramente mecánico de enseñanza que se observa casi

en todas partes», e intuía sus consecuencias al decir que mediante este plan el estudiante adquiere «unos obstáculos insuperables para el estudio de la ideología», con la consecuencia de encontrarse «inexactos, precipitados, propensos a afirmar o negar cualquier cosa sin examinarla [...] habituados al orden mecánico de repetir de memoria» (Torres-Cuevas *et al.*, 1997, p. 90).

- La experiencia magisterial del eminente físico Albert Einstein, quien en 1944 opinaba: «Cuando pienso en los estudiantes más capaces [...], es decir, aquellos que se distinguen por su independencia de criterio [...], puedo afirmar que tenían un tremendo interés por la epistemología. Empezaron las discusiones sobre los objetivos y los métodos de la ciencia con felicidad, y mostraban firmemente, a través de su tenacidad, defender sus puntos de vista» («Carta de Einstein a Thornton, 7 de diciembre de 1944», 2001).

Otra orientación que le hemos dado al propósito de integrar la historia y la epistemología de la física a su enseñanza ha sido la confección de materiales originales que han quedado publicados en diferentes medios cubanos y extranjeros, y que pueden servir para la consulta de profesores y estudiantes. Estos materiales están recogidos en una compilación, aún no publicada en su conjunto; los títulos de algunos de estos artículos son: «Historia, filosofía y enseñanza de la Física», «Félix Varela, “Las Lecciones de Filosofía” y la inauguración de la educación científica en Cuba: inclinación por la física», «Cultura científica y pensamiento científico en José Martí», «Raíces históricas de la enseñanza de la física en Cuba: desde Varela a Gran; un material para maestros de Física», «Un experimento en 1930 sobre energía renovable en Cuba», «Primeros experimentos cubanos de ciencia de los materiales en el espacio: propósitos y resultados», «Primeros pasos de las investigaciones en física del estado sólido en Cuba», «Acerca de la enseñanza de la Física en Cuba», «Aproximación a la historia de la preparación de profesores de Física en Cuba», «El diferendo de Galileo con la Iglesia», «Una mirada al concepto peso», «Materia y antimateria», «Einstein y el efecto fotoeléctrico: un caso de seudohistoria en los textos de Física», «Stephen Hawking: pasión por lo desconocido y voluntad sin límites», «La luz detenida», «Mirar la materia por dentro», «Giordano Bruno: una vida, varias lecturas»,

«Richard Feynman: genialidad y carisma», «El escurridizo bosón de Higgs y el Premio Nobel 2013» y «La nueva luz LED oscurece el futuro de los incandescentes y los fluorescentes».

Conclusiones

En la investigación realizada se ha podido apreciar que existe consenso en la comunidad científica y de educadores sobre lo positivo que puede resultar para la comprensión de la física la integración de la historia y la epistemología al proceso de enseñanza-aprendizaje de esta ciencia.

Se constató, a través de encuestas realizadas, la existencia de insuficientes conocimientos sobre la ciencia en estudiantes universitarios y profesionales egresados de la Facultad de Educación, aun después de haber recibido las asignaturas de ciencia en su preparación como estudiantes y profesores.

Experiencias llevadas a cabo en pequeñas escalas muestran la factibilidad y pertinencia de vincular la historia y la epistemología de la ciencia en su enseñanza.

Bibliografía

- ALAMINO, D. J. y Y. AGUILAR (2018): «Hacia una enseñanza de la física apegada a sus fundamentos», *Revista Cubana de Física*, vol. 35, n.º 1E, La Habana.
- «Carta de Einstein a Thornton, 7 de diciembre de 1944» (2001), en *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, <<http://plato.stanford.edu>> [12/5/2017].
- GIL, D. (1994): «Diez años de investigación en Didáctica de las Ciencias. Realizaciones y perspectivas», *Enseñanza de las Ciencias*, vol. 12, pp. 154-164.
- GIL, D. *et al.* (1996): *Temas escogidos de la didáctica de la Física*, La Habana: Editorial Pueblo y Educación.
- MATTHEWS, M. (1992): «History, Philosophy and Science Teaching: The Present Rapprochement», *Science and Education*, vol. 1, pp. 11-47.
- MINISTERIO DE EDUCACIÓN (2016): *Programa de Física de duodécimo grado*, La Habana.
- POZO, J. I. y M. A. GÓMEZ (2010): «Por qué los alumnos no comprenden la ciencia que aprenden: qué podemos hacer nosotros para evitarlo», *Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales*, n.º 66, octubre, pp. 73-79.
- SINARCAS, V. y J. SOLBES (2013): «Dificultades en el aprendizaje y la enseñanza de la física cuántica en el bachillerato», *Revista de Investigación y Experiencias Didácticas*, n.º 31.3, pp. 9-25.

- SOLBES, J. y M. TRAVER (2001): «Resultados obtenidos introduciendo historia de la ciencia en las clases de Física y Química: mejora de la imagen de la ciencia y desarrollo de actitudes positivas», *Enseñanza de las Ciencias*, vol. 19, n.º 1, pp. 151-162.
- TORRES-CUEVAS, E. *et al.* (1997): *Félix Varela. Obras*, La Habana: Imagen Contemporánea.



La enseñanza de la Física a través de invariantes de conocimientos: una opción metodológica para los planes de estudios E en la carrera Ingeniería Geológica

ROLANDO COBAS ABAD,* ROLANDO M. COBAS GARCÍA,*
ANALIA COBAS GARCÍA**

Introducción

La física se destaca por la utilidad de los principios básicos y generales presentes en una gran variedad de fenómenos físicos que aparentemente no se relacionan entre sí, pero obedecen a las mismas leyes fundamentales. Una vez que estas leyes son comprendidas con claridad, es posible resolver problemas con gran economía de reflexión y esfuerzo (Alonso y Finn, 1971). Según Alonso y Finn (1971): «Las ramas clásicas de la física son y seguirán siendo campos muy importantes de especialización y actividad profesional» (p. 3); sin embargo, consideramos que no tiene mucho sentido estudiar los fundamentos del modo en que se está haciendo. El mismo conjunto de fenómenos incluido bajo el electromagnetismo y la física moderna ha producido una nueva tendencia en el pensamiento que observa los fenómenos físicos desde un punto de vista unificado y más lógico. En otro orden de cosas, la física es importante no solo porque proporciona la base conceptual y la estructura teórica sobre la cual se fundan las otras ciencias naturales, sino también porque desde el punto de vista práctico proporciona técnicas que pueden utilizarse en cualquier área de la investigación pura o aplicada.

Estos elementos cobran cada día más vigencia, sin embargo, la dinámica de la sociedad exige un cambio en la enseñanza no solo de la

* Departamento de Física, Instituto Superior Minero Metalúrgico Dr. Antonio Núñez Jiménez, Holguín, Cuba.

** División de Automática, Empresa de Servicios Técnicos de Computación, Comunicaciones y Electrónica para la Industria del Níquel Rafael Fausto Orejón Forment (SERCONI), Moa, Holguín, Cuba.

física, sino también de otras ciencias básicas, que refleje los adelantos científico-técnicos y la posibilidad de inserción en un mundo muy cambiante en casi todas las esferas de la vida social.

Desarrollo

La enseñanza de la Física en los tiempos actuales está afectada por factores que requieren de atención no solo por las instituciones educativas, sino además por los decisores de políticas educacionales en el país. Al respecto, autores como Ferreyra y González (2000, retomando a Siviter, 1994 y Bandiera *et al.*, 1995) plantean que:

la investigación educativa ha venido señalando en los últimos años una paulatina despoblación de estudiantes en las carreras de física de diversas universidades de todo el mundo. Como indicadores de esta afirmación pueden tomarse diferentes registros de deserción y abandono en dichas titulaciones y de una fuerte disminución de ingresantes a las mismas. (p. 189).

Por otro lado, parece existir inquietud y preocupación entre los docentes y las autoridades universitarias, que han comenzado a plantearse si estas carencias de motivación de los estudiantes de Física por continuar sus estudios, y quizá también el desinterés por iniciarlos, no guarda una estrecha relación con algunas limitaciones y deficiencias de la enseñanza que se les ofrece (Hestenes, 1987; Monk, 1994; Chrobak y Buzsáki, 1996) y con los bajos resultados académicos que obtienen, sobre todo en los cursos introductorios. Al respecto, diferentes autores han señalado la existencia de grandes dificultades en los estudiantes universitarios para aprender significativamente los conceptos físicos que se les enseñan (McDermott, 1991; Goldberg y Bendall, 1995; Wells, Hestenes y Swackhamer, 1995; Wainmaier y Plastino, 1995; Alurralde *et al.*, 1995).

A las dificultades de enseñanza y aprendizaje de la Física en el contexto universitario se han referido muchos autores, por ejemplo, Ma. del Socorro Elizondo Treviño (2013), quien plantea:

La enseñanza de la Física se ha basado tradicionalmente en la visión del profesor sobre el contenido y la percepción del estudiante. La enseñanza tradicional de la Física tiene como principales características que su enseñanza y aprendizaje están orientados hacia el conocimiento y no hacia el proceso de aprendizaje. (p. 70).

Respecto a las dificultades de la enseñanza de las ciencias Pósito (2012) plantea:

se requieren profundas transformaciones en la docencia universitaria para que su oferta educativa sea pertinente y relevante con las nuevas demandas sociales. El trabajo docente convencional organizado, basado en un enfoque academicista centrado en los contenidos, debe ser reorientado al desarrollo de competencias profesionales que permitan lograr un «saber hacer fundamentado» en contextos y situaciones de su campo profesional y en las capacidades de auto aprendizaje y desarrollo profesional que le permitan desempeñarse exitosamente en un mundo laboral competitivo, cambiante e impredecible y que privilegia fuertemente los equipos de trabajo. La actualización de la docencia universitaria significa pasar de la transmisión de conocimientos de contenidos de tipo académico hacia un énfasis en la enseñanza de procesos, estrategias, habilidades y disposiciones con el conocimiento disciplinario y cultural para la construcción por parte de los alumnos de nuevas competencias y capacidades para aprender y seguir aprendiendo en forma permanente, pensar en forma competente, resolver problemas y tomar buenas decisiones. (pp. 6-7).

Compartimos la idea de la obsolescencia de los modelos de aprendizaje; según Villarreal *et al.* (2005):

En los años 60 apareció el modelo de aprendizaje por descubrimiento que pretendía poner al estudiante en las condiciones del investigador, como vía que lo llevara a la adquisición del conocimiento, potenciando de este modo la aplicación del método experimental y con ello de las prácticas de laboratorio, actividad que siempre ha despertado gran interés en los docentes de Física. (p. 3).

Este modelo se caracteriza por tres elementos claves que tributaban a la adquisición del conocimiento: autónomo, inductivo e incidental, y precisamente estas pueden ser sus limitaciones: el inductivismo extremo, el exceso de autonomía y lo incidental, que se relaciona con lo disperso y la falta de guía del aprendizaje. El modelo prevalece hoy en día en nuestras instituciones y con la presencia de profesionales de la Física que no dominan a plenitud la disciplina. Luego surge el modelo de «aprendizaje por recepción significativa», que de cierto modo sustituye al anterior; es una muestra del rechazo al inductivismo y aparenta ser un regreso a la

transmisión-recepción tradicional de conocimientos, aunque no lo es, pues por la atención que presta «a los conocimientos previos de los alumnos y a la integración de los nuevos conocimientos en sus estructuras conceptuales es coherente con el papel que los paradigmas teóricos juegan en todo el proceso de investigación científica» (Villarreal *et al.*, 2005, p. 3). La dirección del profesor, como guía científico del investigador novel, permite que se obvie el obstáculo del trabajo autónomo o el descubrimiento incidental. Este modelo tiene en sus bases la asimilación de conceptos por los alumnos, los cuales no participan en su construcción, para lo que necesitarían de un tiempo propio que no se tiene en cuenta; y en cuanto a la resolución de problemas se dirige a la comprensión de las soluciones.

Todos estos elementos que se observan en otros países también se dan con iguales características en nuestras instituciones, lo que nos permite inferir que se trata de un fenómeno universal y nos indica al mismo tiempo la necesidad urgente de buscar nuevas alternativas metodológicas que minimicen los efectos del pobre rendimiento en el aprendizaje de la Física.

1. Las invariantes: una mirada desde la física

Las leyes de Newton consideran que el tiempo y el espacio son los mismos para los diferentes observadores de un mismo fenómeno físico. Antes de la formulación de la teoría especial de la relatividad, Hendrik Lorentz y otros ya habían descubierto que el electromagnetismo difería de la física newtoniana en que las observaciones de un fenómeno podrían diferir de una persona a otra que estuviera moviéndose relativamente a la primera a velocidades próximas a las de la luz. Así, una puede observar la inexistencia de un campo magnético mientras la otra observa dicho campo en el mismo espacio físico.

Lorentz sugirió una teoría del éter en la cual objetos y observadores viajarían a través de un éter estacionario, sufriendo un acortamiento físico (hipótesis de contracción de Lorentz) y un cambio en el paso del tiempo (dilatación del tiempo). Esto suministraba una reconciliación parcial entre la física newtoniana y el electromagnetismo, que se conjugaban aplicando la transformación de Lorentz, la cual vendría a sustituir a la de Galileo vigente en el sistema newtoniano. Cuando las velocidades involucradas son mucho menores que c (la velocidad de la luz), las leyes resultantes son, en la práctica, las mismas que en la teoría de Newton, y las transformaciones se reducen a las de Galileo. De cualquier forma, la teoría del éter fue criticada incluso por el mismo Lorentz debido su naturaleza *ad hoc*.

Cuando Lorentz sugirió su transformación como una descripción matemática precisa de los resultados de los experimentos, Einstein derivó dichas ecuaciones de dos hipótesis fundamentales: la constancia de la velocidad de la luz, c , y la necesidad de que las leyes de la física sean iguales (invariantes en diferentes sistemas inerciales, es decir, para diferentes observadores). De esta idea surgió el título original de la teoría, «Teoría de los invariantes». Fue Max Planck quien sugirió después el término «relatividad» para resaltar la noción de transformación de las leyes de la física entre observadores moviéndose relativamente entre sí.

2. Las invariantes de conocimientos en los entornos de aprendizaje

El proceso de enseñanza-aprendizaje (PEA) actual requiere de precisar núcleos de contenidos no numerosos, pero sí necesarios y suficientes, que le permitan al estudiante extrapolar, analizar, comparar y generalizar.

La contradicción fundamental en el proceso de enseñanza-aprendizaje es la existente entre las nuevas tareas que la enseñanza le plantea al estudiante y las actuales condiciones para resolverlas, sin embargo, para su solución son necesarios nuevos esfuerzos, vinculados a la concepción desarrolladora. En nuestro criterio, no es cualquier enseñanza la que produce desarrollo, sino la que toma en consideración las potencialidades de los estudiantes en cada momento y se instrumenta sobre lo que han adquirido, pero esencialmente sobre lo que deben adquirir, por eso considera una enseñanza hacia el futuro y concreta la relación entre enseñanza y desarrollo reflejando en cada época y contexto las exigencias sociales a la formación del estudiante. Esta particularidad sigue constituyendo un objetivo priorizado para asimilar los nuevos cambios que se introducen en el proceso de enseñanza-aprendizaje (Villarreal *et al.*, 2005).

Según Germinal Cocho Gil (2013), un aspecto de la ciencia actual es la búsqueda de los fundamentos de las disciplinas. Analizando el punto en las teorías científicas actuales, estas no son fundamentales, sino que tienen un carácter emergente, como el caso de la termodinámica. Físicos importantes, incluyendo premios nobel, estudian el posible carácter emergente de la física cuántica y las teorías de norma de la física del micromundo, en la búsqueda de aspectos colectivos que establezcan síntesis como las que tuvieron lugar en el siglo XIX con la mecánica estadística y el electromagnetismo, síntesis que impliquen puentes entre la física, la biología y las ciencias sociales, y con la visión del mundo del «hombre común».

Este autor plantea, además, que la física deja el siglo xx y transita hacia otros horizontes donde los desafíos abiertos no son pocos y cuya naturaleza fundamental hace pensar en revoluciones científicas en ciernes.

Ciencia y tecnología se nutren mutuamente guiadas por el entorno histórico en el que se desenvuelven. Juntas empujan las fronteras de nuestro conocimiento sobre el universo y la naturaleza. En su imparable búsqueda para comprender, desde el origen, estructura y evolución del universo hasta los mecanismos que gobiernan la complejidad social, la física se vale de innumerables recursos intelectuales al mismo tiempo que los impulsa. Una guía infalible y prueba de los modelos teóricos más revolucionarios son los experimentos, que hoy en día han alcanzado grados de sofisticación en otros tiempos inimaginables (Cocho Gil, 2013).

Estos elementos son las bases que sustentan una enseñanza de la Física universitaria para los nuevos planes de estudio E, partiendo de la particularidades de la carrera de Ingeniería Geológica en nuestro país.

A partir de un análisis de las principales magnitudes físicas y su importancia en el desarrollo del aprendizaje se estableció un nivel de jerarquización de los contenidos y se organizó el sistema de contenido de Física I para la carrera de Ingeniería Geológica correspondiente al plan E en la Universidad de Moa. Los cuadros 1a, 1b, 2a y 2b relacionan e integran las magnitudes físicas entre los diferentes temas objeto de estudio en la carrera y la figura 1 muestra los temas de Física I propuestos en esta.

Cuadro 1a. Cinemática y dinámica del movimiento de traslación y rotación

TEMA	MODELOS	CONCEPTOS BÁSICOS	LEYES Y PRINCIPIOS	PROBLEMAS PROFESIONALES A LOS QUE TRIBUTA
DINÁMICA	Punto material, cuerpo rígido.	Movimiento, posición, velocidad, aceleración.	Galileo, Kepler, Newton.	Desplazamiento de las placas tectónicas y los plegamientos.

Cuadro 1b. Simbología y magnitudes

CINEMÁTICAS	DINÁMICAS	ENERGÉTICAS
θ : posición angular	I: momento inercia	W: trabajo
t: tiempo	M: momento fuerza	E: energía
ω : velocidad angular	L: cantidad de movimiento	n: potencia
α : aceleración	j: impulso	η : eficiencia

Cuadro 2a. Dinámica de los fluidos y cuerpos deformables

TEMA	MODELOS	CONCEPTOS BÁSICOS	LEYES Y PRINCIPIOS	PROBLEMAS PROFESIONALES A LOS QUE TRIBUTA
DINÁMICA	Cuerpos deformables, fluidos.	Movimiento, posición, velocidad, aceleración.	Hook, Bernoulli, Pascal.	Deformaciones, fenómenos sísmicos, terremotos.

Cuadro 2b. Simbología y magnitudes

CINEMÁTICAS	DINÁMICAS	ENERGÉTICAS
r: posición	m: masa	W: trabajo
t: tiempo	p: cantidad de movimiento	E: energía
V: volumen	f: fuerza	n: potencia
G: gasto	j: impulso	η : eficiencia
A: superficie		

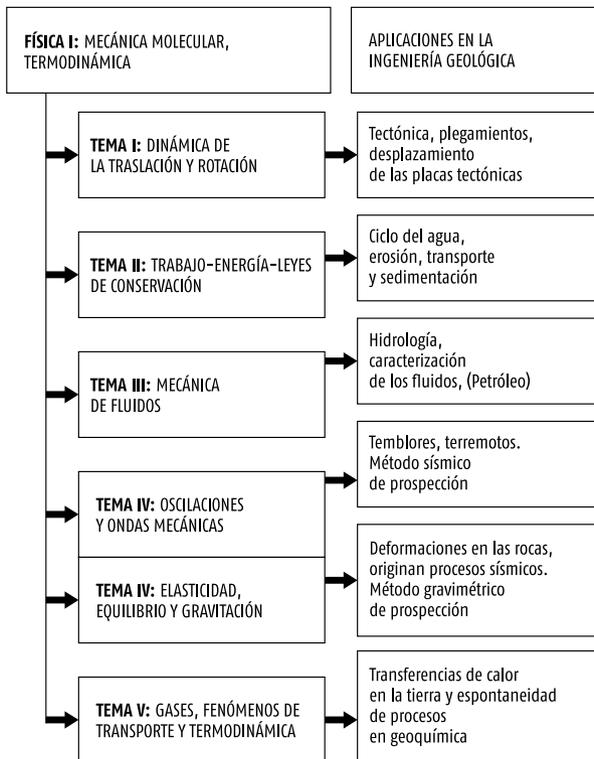


Figura 1. Propuesta de temas de Física I para la Carrera de Ingeniería Geológica de la Universidad de Moa.

Conclusiones

La propuesta de integración y ordenamiento lógico de conceptos a partir de las invariantes consigue un análisis lógico e integrador y garantiza un buen aprendizaje en los estudiantes, de modo que permite el desarrollo del pensamiento investigativo, elemento importante en la concepción de los planes de estudios E.

Bibliografía

- ALONSO, MARCELO y EDWARD J. FINN (1971): *Física V.I. Mecánica*, México D. F.: Fondo Educativo Interamericano, S. A.
- ALURRALDE DE REVOL, E.; V. JAVI, C. MARTÍNEZ, M. T. MONTERO, H. BÁRCENA, R. GALARZA DE MARTÍNEZ y O. BIXQUERTDE RIVELLI (1995): «Aprendizaje de Física Básica», en *Memorias REF IX*, Salta, Argentina, pp. 102-112.
- AZAHARES, T. (2011): «La formación integral del ingeniero minero-metalúrgico en su vínculo con la sociedad», *Revista Electrónica Cuadernos de Educación y Desarrollo*, vol. 3, n.º 23, <<http://www.eumed.net/reviced/23/taf.htm>> [12/10/2018].
- CHROBAK, J. J. y G. BUZSÁKI (1996): «High-frequency Oscillations in the Output Networks of the Hippocampal-entorhinal Axis of the Freely Behaving Rat», *Journal of Neuroscience*, vol. 16, n.º 9, pp. 3056-3066.
- COCHO GIL, GERMINAL (2013): «Prólogo», en O. Miramontes y K. Volke (eds.), *Frontera de la Física en el siglo XXI*, México D. F.: Coplit-arXives, pp. XIII-XIV. ISBN 978-1-938128-03-5 ebook.
- ELIZONDO TREVIÑO, M. DEL S. (2013): «Dificultades en el proceso enseñanza-aprendizaje de la Física», *Presencia Universitaria*, año 3, n.º 5, enero-junio, pp. 70-77.
- FERREYRA, ADRIANA y EDUARDO M. GONZÁLEZ (2000): «Reflexiones sobre la enseñanza de la física universitaria», *Enseñanza de las Ciencias*, vol. 18, n.º 2, pp. 189-199.
- GOLDBERG, F. y S. BENDALL (1995): «Making the Invisible Visible: A Teaching/Learning Environment that Builds on a New View of the Physics Learner», *American Journal of Physics*, vol. 63, n.º 11, pp. 978-991.
- HESTENES, D. (1987): «Hacia una teoría que modela de instrucción de Física», *Diario Americano de Física*, vol. 55, n.º 8, pp. 440-454.
- MCDERMOTT, L. C. (1991): «A View from Physics», M. Gardner, J. Greeno, F. Reif, A. H. Schoenfeld, A. DiSessa y E. Stage (eds.), *Toward a Scientific Practice of Science Education*, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, Inc., pp. 3-30.

- MIRAMONTES, O. y K. VOLKE (eds.) (2013): *Fronteras de la física en el siglo XXI*, México D. F.: CopIt ArXives.
- MONK, M. (1994): «Mathematics in Physics Education: a Case of more Haste less Speed», *Physics Education*, vol. 29, n.º 4, pp. 209-211.
- PÓSITO DE ROCA, ROSA MARÍA (2012): «El problema de enseñar y aprender ciencias naturales en los nuevos ambientes educativos», tesis de doctorado en Tecnología Informática Aplicada en Educación, Facultad de Informática, Universidad Nacional de La Plata.
- VILLARREAL, M.; H. LOBO, G. GUTIÉRREZ, J. BRICEÑO, J. ROSARIO y J. C. DÍAZ (2005): «La enseñanza de la Física frente al nuevo milenio», Trujillo: Universidad de los Andes, Núcleo Rafael Rangel.
- WAINMAIER, C. O. y A. PLASTINO (1995): «En búsqueda de una enseñanza que propicie aprendizajes significativos», *Memorias REF IX*, Salta, Argentina, pp. 93-101.
- WELLS, M.; D. HESTENES y G. SWACKHAMER (1995): «A Modeling Method for High School Physics Instruction», *American Journal of Physics*, vol. 63, n.º 7, pp. 606-619.



Un problema de Física General sobre ondas gravitacionales y fusión de agujeros negros

EDWIN PEDRERO*

Introducción

La existencia de ondas gravitacionales (OG) fue predicha por Albert Einstein en 1916 como una consecuencia de su teoría general de la relatividad (TGR) (Einstein, 1916). Cien años más tarde, en febrero de 2016 vio la luz un artículo en el que se describe la detección, por primera vez, de una OG y la fusión de dos agujeros negros que ocurrió hace más de cien millones de años (Abbott *et al.*, 2016). La noticia de tan notable descubrimiento fue difundida rápidamente en los principales medios de comunicación del mundo (Corral, 2016; Domínguez, 2016).

La repercusión global de esa noticia es una oportunidad excepcional para acercar a estudiantes de ciencias, ingenierías y enseñanza de la Física al conocimiento de un fenómeno físico trascendente, en tiempo real de sus vidas en las aulas universitarias.

Esto me motivó a elaborar un problema que pudiera ser resuelto, en lo fundamental, con conocimientos de mecánica newtoniana. Esa motivación inicial se reforzó con la lectura de dos artículos dedicados a abordar este notable descubrimiento científico con conocimientos básicos de Física (Mathur, Brown y Lowenstein, 2016; Abbott *et al.*, 2017).

En la II Olimpiada Latinoamericana Universitaria de Física (II OLUF), organizada por la Sociedad Cubana de Física en 2018 el problema fue aplicado a 197 estudiantes de 10 países latinoamericanos (Argentina, Belice, Brasil, Colombia, Costa Rica, Cuba, El Salvador, Guatemala, México y Venezuela). Esa aplicación fue un experimento pedagógico en el campo de la enseñanza de la Física universitaria.

* Instituto de Ciencia y Tecnología de Materiales, Universidad de La Habana, Cuba.

Los principales elementos tomados en cuenta para elaborar el problema y los principales resultados y conclusiones del experimento pedagógico se exponen en este trabajo.

1. Fundamentación

Desde el punto de vista psicopedagógico, tres ideas principales orientaron la elaboración didáctica del problema. Estas están relacionadas con la motivación, la creatividad y los modelos conceptuales.

1.1. La motivación para el aprendizaje

El aprendizaje exige un papel activo del estudiante y su actividad depende, en gran medida, de cuán motivado esté para aprender algo específico. Esa conexión entre motivación, actividad y aprendizaje fue una idea rectora al elaborar el problema. La fundamentación psicopedagógica de esa conexión ha sido expuesta por varios autores, entre ellos los pedagogos Pablo y Rolando Valdés Castro (2004, p. 15).

Se tuvo en cuenta que en el ambiente histórico-cultural de los estudiantes de Física universitaria, la obra de Einstein tiene un atractivo que, bien aprovechado, puede servir para motivar el interés de ellos por comprender algunas nociones esenciales de un fenómeno que muy pronto entró a formar parte del universo cultural global, de la cultura general de los físicos y de otros profesionales con formación de Física General.

Con la intención de añadir valor motivacional al problema, se incluyeron en el enunciado dos figuras del artículo científico de Abbott y más de mil coautores (2016) que detonó la difusión inmediata a escala global de ese descubrimiento. Además de la referencia explícita a esa publicación, se resaltó el hecho de que los autores principales del experimento fueron galardonados con el Premio Nobel de Física de 2017, pocos meses antes de realizarse la II OLUF.

1.2. El desarrollo de la creatividad

Este importante proceso de la personalidad tiene múltiples aristas (Mitjans, 1990). En la concepción pedagógica del problema que se presenta aquí todas las preguntas fueron concebidas para estimular, en mayor o menor medida, la actividad creadora de los estudiantes, a lo cual contribuye el hecho de que el problema sea nuevo para ellos, con una contextualización significativamente diferente de los que se hallan en libros de Física universitaria.

No obstante, en las primeras seis preguntas (incisos) el acento está en el pensamiento deductivo, con el propósito de evaluar el aprendizaje significativo de conceptos, leyes y fenómenos adecuados al enunciado de cada pregunta. En tanto que la última pregunta se hizo con una formulación abierta y cualitativa, cuya respuesta exige un pensamiento reflexivo, divergente, independiente, con cierta dosis de creatividad en la búsqueda de alternativas, más que de conocimientos de física.

Para elaborar la última pregunta se siguieron los consejos del premio nobel de Física Píotor Kápitza (1985) de educar la independencia de pensamiento con preguntas en forma poco concreta y con alguna aparente contradicción entre las nociones teóricas y el experimento. Esto se hace con el deliberado propósito de estimular más el pensamiento dialéctico que el deductivo o inductivo. La respuesta a esta última interrogante demanda más creatividad, pensamiento abierto, divergente y flexible, que conocimientos de física y matemática.

1.3. Un modelo conceptual adecuado

El problema fue elaborado con la perspectiva de que, además de su aplicación inmediata en la II OLUF, fuera útil por su valor metodológico para la enseñanza de la Física en el nivel universitario.

Una vez definido que se propondría un problema relacionado con el descubrimiento de las OG, que pudiese introducir a estudiantes de los primeros años de carreras de ciencias, ingeniería o educación en el campo de la cosmología o la astrofísica, resultó evidente la necesidad de elaborar un modelo conceptual adecuado (Moreira, Greca, y Rodríguez, 2002). Estaría orientado a transformar de manera positiva modelos mentales de los estudiantes creados por el reiterado uso de experiencias pedagógicas que tradicionalmente los han colocado ante problemas que distan mucho de la ciencia de frontera en el momento histórico de su tránsito por las aulas universitarias.

Durante la elaboración del problema fue necesario estudiar tópicos imprescindibles de TGR sobre agujeros negros y OG (Barbosa, 2009), el artículo del descubrimiento de las OG (Abbot *et al.*, 2016) y otros en los que se analiza ese descubrimiento desde la Física Básica (Mathur, Brown y Lowenstein, 2016; Abbott *et al.*, 2017).

El modelo conceptual desarrollado está constituido por el enunciado del problema y su solución, así como por los comentarios sobre el grado de concordancia de las respuestas dadas a las diferentes preguntas y los límites de validez de algunas aplicaciones de conceptos y leyes de la

mecánica newtoniana al abordar tópicos que, por su complejidad física y matemática, no pueden ser tratados en los cursos de Física universitaria.

Su fundamento principal es la relación que existe entre la complejidad del conocimiento de un ente físico cualquiera y la longitud del mensaje utilizado para describirlo. Esa concepción es expuesta por el creador de la teoría de los quarks y premio nobel de Física Murray Gell-Mann en *El quark y el jaguar* (Gell-Mann, 1998).

En lo que al proceso de enseñanza-aprendizaje se refiere, se tuvo en cuenta la postura de Gell-Mann, quien le confiere significativa importancia al contexto y a las regularidades, como factor estrechamente relacionado con la longitud del mensaje descriptivo.

De manera particular, en el problema que aquí se presenta, el acortamiento del mensaje se da porque la aproximación newtoniana del problema y su solución pueden ser comprensibles por quien domine conceptos y leyes fundamentales de la física, sin necesidad de poseer conocimientos de TGR.

Por su estructura, el problema consta de un párrafo introductorio dedicado a contextualizar la novedad y trascendencia científica de la primera confirmación experimental de las OG y siete preguntas (incisos).

2. Enunciado

En 1916 Albert Einstein predijo que las masas aceleradas emiten OG que se propagan con la misma rapidez (c) que la luz en el vacío y a su paso deforman el espacio, modificando las dimensiones de los cuerpos que lo ocupan. Estas ondas fueron detectadas por primera vez el 14 de septiembre de 2015 en un evento astrofísico identificado como GW150914, y permitieron observar, también por primera vez:

1. agujeros negros de masa mayor que 30 veces la masa M del Sol,
2. un sistema de dos agujeros negros que giran alrededor de su centro de masas común,
3. la evolución de ese sistema en espiral hasta la fusión de los dos agujeros negros (figuras 1 y 2).

El premio Nobel de Física 2017 fue otorgado a R. Weiss, B. C. Barish y K. S. Thorne por sus decisivas contribuciones a la creación del detector LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Waves Observatory) y a la observación de las OG.

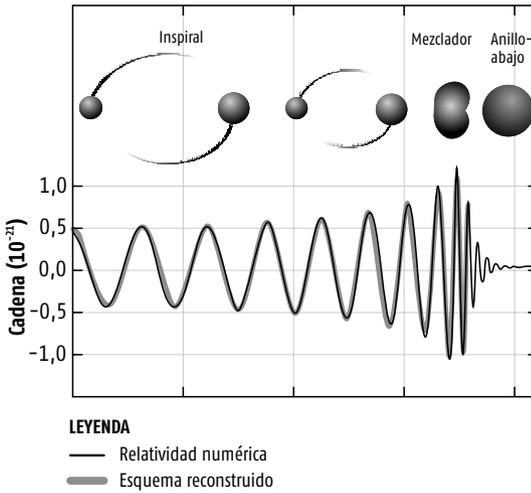


Figura 1. Evolución del sistema binario de agujeros negros observado y de la deformación relativa de una longitud medida durante el paso de la GW150914 por uno de los observatorios LIGO.

Fuente: Abbott *et al.* (2016).

La evolución del sistema binario antes de su fusión puede describirse aproximadamente con la mecánica newtoniana. Para los cálculos use $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/\text{s}^2 \cdot \text{kg}$; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$; $M_0 = 2,00 \cdot 10^{30} \text{ kg}$.

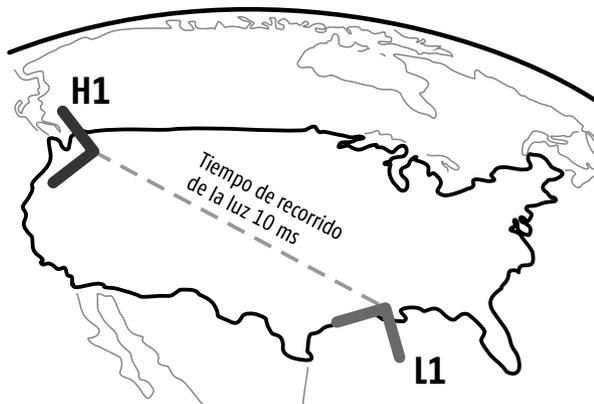


Figura 2. Localización de las instalaciones del experimento LIGO que detectaron la GW150914 en Livingston (L1) y Hanford (H1).

Fuente: Abbott *et al.* (2016).

Pregunta 1

Demuestre que si los agujeros negros se representan por dos masas puntuales m_1, m_2 situadas a la distancia d , que giran en órbitas circulares con velocidad angular respecto a su centro de masa, se cumple que:

$$\omega^2 = \frac{G(m_1 + m_2)}{d^3}$$

donde G es la constante de gravitación universal.

Pregunta 2

Demuestre que la energía mecánica del sistema binario cuando su centro de masas está en reposo se puede expresar como:

$$E = -\frac{Gm_1m_2}{2d} = -\frac{G^{2/3}m_1m_2}{2(m_1 + m_2)^{1/3}} \omega^{2/3}$$

Pregunta 3

Al disminuir la distancia entre los agujeros negros, su energía mecánica disminuye por la emisión de OG, cuya frecuencia $f = \omega/\pi$ aumenta con el tiempo. De acuerdo con la TGR, la potencia emitida es proporcional al cuadrado del momento de inercia y viene dada por:

$$P = \frac{32G}{5c^5} I^2 \omega^6$$

La forma en que evoluciona en el tiempo está relacionada con la denominada «masa de chirrido» (*chirpmass*):

$$M \equiv \frac{(m_1m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}}$$

Suponiendo que la potencia emitida en forma de OG es igual a la pérdida de energía mecánica del sistema, demuestre que la «masa de chirrido» está dada por:

$$M = \frac{c^3}{G} \left(\frac{5}{96} \pi^{-\frac{8}{3}} f^{-\frac{11}{3}} \frac{df}{dt} \right)^{\frac{3}{5}}$$

Las mediciones de f y su derivada temporal $\frac{df}{dt}$ en el evento GW150914 permitieron determinar $M \approx 30M_\odot$.

Pregunta 4

Asuma que los agujeros negros tienen masas iguales. Estime el valor de la masa de cada agujero negro, en términos de la masa solar M_\odot y calcule su separación cuando la frecuencia de la OG alcanzó su valor máximo ($f_{max} = 150 \text{ Hz}$).

Pregunta 5

La mínima distancia a la que un objeto puede acercarse a un agujero negro, llamada radio de Schwarzschild, es aquella a la que ni siquiera la luz puede escapar de su atracción. Demuestre que la separación calculada en el inciso anterior es mayor que la mínima distancia a la que pueden acercarse dos agujeros negros antes de su fusión.

Pregunta 6

Calcule la energía emitida en forma de OG, durante la evolución del sistema binario, desde que los agujeros negros estaban separados por una distancia muy grande hasta que estuvieron a la distancia d_0 . Exprese esa pérdida de energía en función de M .

Pregunta 7

¿Cómo Ud. explica que la onda gravitacional GW150914 demoró aproximadamente 7 ms en llegar del observatorio LIGO en Livingston al de Hanford, si la distancia entre los dos observatorios es de $\sim 3000 \text{ km}$?

3. Resolución

Respuesta 1

Sean d_1 y d_2 las distancias del centro de masa del sistema binario a los cuerpos puntuales de masas m_1 y m_2 respectivamente y $d = d_1 + d_2$ la distancia entre ellos. Considerando que son iguales la fuerza atracción gravitacional dada por $F_G = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$ y la fuerza centrípeta dada por $F_C = m_1 \omega^2 d_1 = m_2 \omega^2 d_2$, se obtiene la igualdad buscada:

$$\omega^2 = \frac{G(m_1 + m_2)}{d^3} \quad (1)$$

La (1) puede ser interpretada como un caso particular de la tercera ley de Kepler, debido a la proporcionalidad directa entre el cuadrado del período ($T = 2\pi/\omega$) y el cubo del diámetro de la órbita d .

De la (1) se deriva que si los dos agujeros negros se mueven siguiendo trayectorias en espiral hasta que se funden, la frecuencia del movimiento orbital ($f_{orb} = 1/T = \omega/2\pi$) aumenta progresivamente durante el acercamiento de ambos.

Respuesta 2

Asumiendo que el centro de masa del sistema binario está en reposo, y que I es el momento de inercia con respecto a un eje perpendicular al plano de rotación que pasa por el centro de masa, la energía mecánica del sistema se puede escribir en la forma siguiente:

$$E = K + U = \frac{1}{2} I \omega^2 - G \frac{m_1 m_2}{d} \quad (2)$$

Por otra parte, $d_1 m_1 = d_2 m_2$, $d_1 = \frac{m_2}{m_1 + m_2} d$, $d_2 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} d$ y

$I = m_1 d_1^2 + m_2 d_2^2$. Luego

$$I = \left(\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \right) d^2 \quad (3)$$

Esta última expresión se puede escribir también como $I = \mu d^2$ donde $\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$ es la masa reducida del sistema.

De (1), (2) y (3), se obtiene E en función de la velocidad angular ω :

$$E = -\frac{G m_1 m_2}{2d} = -\frac{G^{2/3} m_1 m_2}{2(m_1 + m_2)^{1/3}} \omega^{2/3} \quad (4)$$

Si no se considera otra forma de energía del par de agujeros negros, esta es la energía interna del sistema binario formado por ellos.

Respuesta 3

En el enunciado de esta pregunta se dice que la potencia de la OG emitida viene dada por $P = \frac{32G}{5c^5} \dot{I}^2 \omega^6$. Sustituyendo las expresiones para I y ω dadas por (1) y (3), se obtiene la (5):

$$P = \frac{32}{5} I^2 \omega^6 G c^{-5} = \frac{32}{5 c^5} G^{7/3} \omega^{10/3} \frac{(m_1 m_2)^2}{(m_1 + m_2)^{2/3}} \quad (5)$$

Por otra parte, derivando $\frac{dE}{dt}$ de (4), se obtiene

$$P = -\frac{dE}{dt} = \frac{5 c^5}{96} G^{-5/3} \omega^{-11/3} \frac{d\omega}{dt} \quad (6)$$

Finalmente, teniendo en cuenta que en el enunciado de esta pregunta se dice que la OG emitida tiene una frecuencia dada por $f = \frac{\omega}{\pi}$ e igualando los miembros de la derecha de (5) y (6) y elevando ambos miembros a $3/5$, se llega al resultado buscado:

$$M = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}} = \frac{c^3}{G} \left(\frac{5}{96} \pi^{-8/3} f^{-11/3} \frac{df}{dt} \right)^{3/5} \quad (7)$$

Teniendo en cuenta que m_1 y m_2 son positivos, de la expresión (7) se concluye que $M > 0$. Luego $\frac{df}{dt} > 0$.

Por otra parte, comparando la frecuencia de la OG emitida $f = \frac{\omega}{\pi}$, que es un dato del enunciado de esta pregunta, con la frecuencia orbital $f_{orb} = \frac{\omega}{2\pi}$ de los agujeros, se deduce que $f_{orb} = \frac{f}{2}$. La deducción rigurosa de esa relación entre ambas frecuencias es un resultado de la TGR, particularmente de la teoría de la emisión de OG. Aquí se ha introducido esa noción a partir de relacionar conocimientos de mecánica newtoniana con informaciones del enunciado. Así, de manera indirecta el estudiante puede conocer que la frecuencia de la OG es el doble que la frecuencia orbital de los agujeros negros, lo cual caracteriza este tipo de ondas.

Debido a que $\frac{df}{dt} > 0$, otra conclusión importante que se puede extraer de este inciso es que $\frac{df_{orb}}{dt} > 0$.

Esta última desigualdad concuerda con el aumento progresivo de la frecuencia orbital durante el proceso de aproximación paulatina de los agujeros negros en sus movimientos en espiral antes de la fusión del sistema binario.

Respuesta 4

De acuerdo con el enunciado de la pregunta 3, $M \sim 30 M_{\odot}$, mientras que del enunciado de la pregunta 4, $m_1 = m_2$. Al sustituir este valor de M en la expresión $M = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}}$, se obtiene $m_1 = m_2 \sim \sqrt[5]{2} (30 M_{\odot}) \sim 34,5 M_{\odot}$.

Al respecto, merece ser resaltado que el valor obtenido en este problema para la masa de cada agujero negro concuerda satisfactoriamente con los valores estimados en el experimento LIGO (Abbott *et al.*) para la masa inicial de los agujeros negros del sistema binario ($\sim 36_{-4}^{+5} M_{\odot}$ y $\sim 29_{-4}^{+4} M_{\odot}$). Como se puede apreciar, el valor $34,5 M_{\odot}$ cae dentro del intervalo $36_{-4}^{+5} M_{\odot}$.

Por otra parte, utilizando $m_1 = m_2 \sim 34,5 M_{\odot}$, se tiene que $m_1 + m_2 \sim 69 M_{\odot}$.

Despejando en la ecuación (1), tomando en cuenta que $\omega = \pi f$ y considerando que d_0 es la distancia entre los agujeros negros cuando la frecuencia de la OG alcanzó el valor de $f_{max} = 150$ Hz se llega al valor buscado en este inciso:

$$d_0 = \left[G \frac{69 M_{\odot}}{(\pi f_{max})^2} \right]^{1/3} \sim 346 \text{ km}$$

Este valor calculado de la separación entre los dos agujeros negros en el instante de ser emitidas las OG con la frecuencia de 150 Hz coincide satisfactoriamente con el valor de ≈ 350 km reportado por los descubridores del evento GW150914 (Abbott *et al.*, 2016). Cabe precisar que la frecuencia de 150 Hz corresponde a la máxima amplitud de la OG representada en la figura 1 (Abbott *et al.*, 2016, 2017). Fue la máxima frecuencia medida en el experimento LIGO durante un intervalo de aproximadamente 0,2 s en el cual la frecuencia de la OG aumentó de 35 Hz a 150 Hz, en unos de 8 ciclos del movimiento en espiral.

Respuesta 5

La mínima distancia a la cual un objeto puede acercarse a un agujero negro sin ser atrapado por este último es llamada radio de Schwarzschild R_s . A una distancia $r < R_s$ del centro de un agujero negro ni siquiera la luz puede escapar de su atracción.

La deducción rigurosa de la expresión para calcular el radio de Schwarzschild se puede encontrar en libros de TGR (Barbosa, 2009), aunque también puede ser introducida desde una aproximación newtoniana al abordar el estudio de los agujeros negros en el nivel universitario como hacen, por ejemplo, Young y Freedman (2009).

Estos autores asumen como aproximación que puede sustituirse la rapidez c de un fotón en la ecuación que relaciona la rapidez de escape v

de un cuerpo que está en la superficie de un cuerpo esférico de radio R y M : $v = \left(2GM/R\right)^{1/2}$:

No es una demostración rigurosa, pero permite emplear conceptos de mecánica newtoniana a fin de obtener la expresión correcta para calcular el radio de Schwarzschild:

$$R_s = 2Gm/c^2 \quad (8)$$

Esta aproximación se basa en considerar que puede ser aplicada al fotón una condición que es válida solamente dentro de los límites de la mecánica newtoniana.

Un cuerpo de masa m' y velocidad v no puede escapar del campo gravitacional de otro de masa m del cual está separado una distancia r cuando la suma de la energía cinética y la energía potencial del primero es un valor negativo. Bajo esas condiciones $\frac{1}{2}m'v^2 - \frac{Gmm'}{r} < 0$ y la relación límite para que pueda escapar es $r = 2Gm/v^2$, que con $c = v$ conduce a la (8).

Las limitaciones de esta analogía son expuestas por los mismos autores en su libro de *Física universitaria* (Young y Freedman, 2009).

Lo dicho arriba no impide resolver correctamente nuestro problema, porque no interesa demostrar la ecuación (8), que por demás no es posible dentro de la mecánica newtoniana, sino utilizarla para estimar el valor del radio de Schwarzschild.

Al sustituir en (8) el valor estimado de las masas de los agujeros negros $m \approx 34,5 M_\odot$, se obtiene $R_s \approx 102$ km.

Tomando en cuenta que en este problema ambos cuerpos son agujeros negros, la distancia mínima entre ellos es igual a la suma del radio R_s de cada agujero negro. O sea, $d_{min} = 2R_s \approx 204$ km.

Si se tiene en cuenta que en el inciso anterior se calculó $d_0 = 346$ km resulta que $d_0 > d_{min}$. Lo cual significa que la fusión de los agujeros negros no había ocurrido cuando la OG alcanzó su máxima amplitud, momento en que la frecuencia de las OG fue $f_{max} = 150$ Hz.

Este resultado es consistente con resultados del experimento LIGO (Abbott *et al.*, 2016), en el cual se estimó una separación ≥ 210 km entre ambos agujeros negros cuando la frecuencia orbital fue $f_{orb} = 75$ Hz.

Respuesta 6

Sea que E_i y E_f denotan respectivamente la energía inicial y la energía final del sistema. Considerando que la energía del sistema binario está

dada por (4) y que inicialmente los agujeros negros están muy distantes entre sí ($d \rightarrow \infty$) se obtiene $E_i = 0$.

Entonces, la energía E_{OG} que irradia el sistema binario en forma de OG es exactamente igual a la energía $E_i - E_f$ que pierde el sistema. Y se puede escribir:

$$E_{OG} = E_i - E_f = 0 - \left(-\frac{Gm_1m_2}{2d} \right) = \frac{Gm_1m_2}{2d} \quad (9).$$

Sustituyendo en (9) los valores $m_1 = m_2 = 34,5 M_\odot$, $d = 346$ km, $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/\text{s}^2\text{kg}$; $c = 3 \cdot 10^8$ m/s; $M_\odot = 2,0 \cdot 10^{30}$ kg, la cantidad de energía que se liberó en forma de OG fue $E_{OG} \sim 2,5 M_\odot c^2$.

Aquí también es relevante el hecho de que los autores del experimento LIGO reportaron que la masa del agujero negro formado por la fusión resultó $\sim 3_{-0,5}^{+0,5} M_\odot$ menor que la masa inicial del sistema binario.

Llama la atención que el valor calculado en este inciso de $2,5 M_\odot$ está comprendido dentro del intervalo de confianza del valor estimado en el experimento (Abbott *et al.*, 2016). Hecho que valida el modelo conceptual desarrollado, como una aproximación newtoniana satisfactoria para comprender, en lo esencial, el fenómeno de la fusión del par de agujeros negros.

Respuesta 7

En el enunciado del problema se da como información gráfica (figura 2) que entre los dos detectores del experimento LIGO (uno en Livingston, estado de Louisiana y otro en Hanford, estado de Washington) hay una distancia que la luz recorre en aproximadamente 10 ms. Este es el intervalo de tiempo que demora la luz en recorrer $\sim 3\,000$ km en el vacío. Puesto que no puede recorrer esa distancia en menor tiempo, puede parecer contradictorio el dato de que la OG pasó por el lugar del detector en Hanford después de haber pasado por el detector en Livingston.

La contradicción surge cuando se asume que la OG viajó según la distancia de ~ 3000 km entre ambos detectores. Pero no existe contradicción si se considera que la OG no tiene necesariamente que propagarse en esa dirección, sino que, en principio, puede hacerlo en cualquier dirección.

Por lo tanto, si demoró en pasar por ambos detectores, es porque la OG no recorrió la distancia que hay entre los dos detectores del observatorio LIGO, sino una distancia menor (figura 3):

$$D = (7 \text{ ms})(3 \cdot 10^8 \text{ m/s}) = 2100 \text{ km}$$

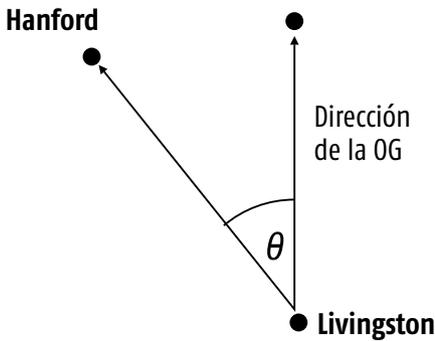


Figura 3. Dirección de propagación de la OG y del vector que une los observatorios LIGO en Livingston, Louisiana y en Hanford, Washington.

La distancia $D = 2100 \text{ km} < 3000 \text{ km}$ significa que el frente de la onda pasó primero por el detector de Livingston y 7 ms después por el de Hanford, en una dirección que forma un ángulo $\theta \neq 0$, como se ilustra en la figura 3. El valor de ese ángulo se puede calcular sabiendo que:

$$\theta \sim \cos^{-1} \frac{7 \text{ ms}}{10 \text{ ms}} \sim 45,6^\circ$$

Este valor de θ significa que la dirección de la OG forma un ángulo de unos 45° con relación a la dirección entre el laboratorio de Livingston, al cual llegó primero la OG, y el de Hanford, al cual la onda llegó con un retardo de $\sim 7 \text{ ms}$.

Una interpretación de estos cálculos permite concluir que la OG GW150914 surgió en algún lugar del universo que está en un círculo que forma un cono de ángulo $\theta \sim 45,6^\circ$ con vértice en el observatorio de Livingston y eje de simetría en la dirección Livingston-Hanford.

Es imposible determinar la posición de esa fuente u otra fuente de OG con mediciones en dos observatorios. Para hacerlo es necesario detectar la OG en, al menos, tres lugares de la Tierra. Entonces, con orientaciones espaciales adecuadas de los detectores y conociendo el tiempo de retardo en la detección de una OG que pase por ellos se podría precisar la dirección de propagación de la OG a su paso por nuestro planeta, con respecto al eje de rotación de la Tierra, por ejemplo.

Al analizar el valor aquí calculado, es importante resaltar que coincide satisfactoriamente con el de $\sim 45^\circ$ reportado por otros autores (Mathur, Brown y Lowenstein, 2016).

4. Análisis de los resultados

Los principales resultados del experimento pedagógico, que consistió en la aplicación del problema a estudiantes universitarios en la II OLUFE, se pueden analizar con base en los datos resumidos en la tabla 1 y la figura 4.

La muestra utilizada para esa tabla y esa figura abarca solo a los concursantes que, con mayor o menor éxito, respondieron preguntas de este problema. Ellos fueron 86 estudiantes de 8 países (Argentina, Brasil, Colombia, Costa Rica, Cuba, El Salvador, Guatemala y México). Los restantes 111 concursantes no respondieron ninguna pregunta (inciso) de este problema.

Tabla 1. Cantidad de concursantes calificados con cero o con la nota máxima en una u otra pregunta

PREGUNTA	CERO	MÁXIMO
1	26	74
2	31	64
3	31	51
4	47	35
5	60	10
6	70	10
7	94	3

En la tabla 1 se presentan la cantidad de concursantes, pertenecientes a la muestra de 86 seleccionados, que por su desempeño en este problema fueron evaluados con la nota mínima (cero) en una u otra pregunta. Y también la cantidad de ellos que alcanzaron la máxima nota en la pregunta en cuestión.

A su vez, en la figura 4 está representado, en porcentaje, cuántos de los 86 concursantes que intentaron resolver este problema fueron calificados con nota cero en una u otra pregunta y también cuántos alcanzaron la máxima calificación en la correspondiente pregunta. Los evaluados con notas intermedias, entre cero y la máxima, no están representados.

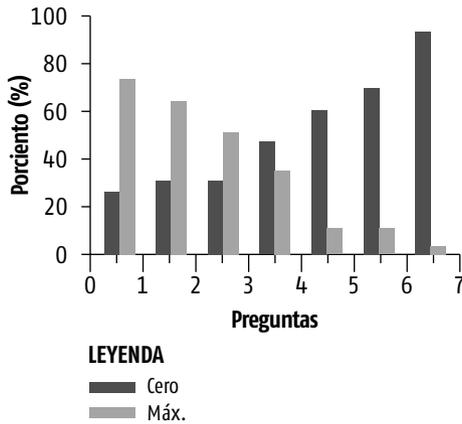


Figura 4. Porcentaje de concursantes calificados con cero o con la nota máxima en una u otra pregunta.

Conclusiones

La elaboración de un problema de física general como una aproximación al estudio de las ondas gravitacionales y el comportamiento de un sistema binario de agujeros negros usando datos experimentales reales resultó ser una experiencia pedagógica positiva en el ámbito de la enseñanza de la Física.

El modelo conceptual desarrollado conduce a resultados cuantitativos satisfactorios, en el sentido de que son comparables con algunos publicados en el artículo que dio a conocer la primera detección de OG (Abbott *et al.*, 2016).

El modelo puede ser utilizado en la enseñanza de la física universitaria como una buena aproximación para comprender que: durante la evolución de un sistema binario de agujeros negros hasta su fusión se genera una OG cuya energía es igual a la energía que pierde el sistema binario durante su evolución; los agujeros negros se acercan entre sí describiendo trayectorias en espiral, con aumento progresivo de la frecuencia del movimiento de rotación de ellos alrededor del centro de masa del sistema binario; el intervalo de tiempo que transcurre entre la detección de la OG en diferentes lugares de la Tierra es consistente con la predicción hecha por Einstein de que las OG se propagan con la misma velocidad que la luz en el vacío.

La resolución del problema por algunos estudiantes de universidades latinoamericanas demostró que el problema es adecuado para quien tenga conocimientos de Física universitaria. Esto avala que

puede ser utilizado en el proceso de enseñanza-aprendizaje en cursos universitarios de Física.

Como era de esperar, la cantidad de estudiantes que alcanzó nota máxima disminuyó con el grado de dificultad creciente de las preguntas, mientras que aumentó la cantidad de respuestas con nota mínima.

La pregunta de mayor dificultad para los estudiantes fue la que exigía menos conocimientos de Física en comparación con las otras; en cambio, exigía más pensamiento creativo.

El problema en general puede ser útil para estimular el pensamiento creativo de los estudiantes.

Bibliografía

- II Olimpiada Latinoamericana Universitaria de Física, <<http://scf.fisica.uh.cu/es/resultados-de-la-2da-olimpiada-latinoamericana-y-del-caribe-de-f%C3%ADsica-universitaria-oluf-2018>> [13/2/2019].
- ABBOTT, B. P. *et al.* (2016): «Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger», *Physical Review Letters*, vol. 116, n.º 6, 061102.
- ABBOTT, B. P. *et al.* (2017): «The Basic Physics of the Binary Black Hole Merger GW150914», *Annals of Physics*, n.ºs 1-2, 1600209.
- BARBOSA, A. (2009): *Teoria da Relatividade Geral. Uma introdução*, Lisboa: IST Press.
- CORRAL, M. G. (2016): «Detectan por primera vez las ondas gravitacionales que predijo Einstein», *El Mundo*, <<https://www.elmundo.es/ciencia/2016/02/11/56bba0d7ca4741cc0b8b4608.html>> [13/2/2019].
- DOMÍNGUEZ, N. (2016): «¿Qué son las ondas gravitacionales? Siete preguntas y respuestas para entender el descubrimiento de hoy por parte del instrumento LIGO?», *El País*, <https://elpais.com/elpais/2016/02/10/ciencia/1455124978_980574.html> [13/2/2019].
- EINSTEIN, A. (1916): *Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation*, Berlin: Sitzungsberichte, Königlich Preußische Akademie der Wissenschaften, pp. 688-696.
- GELL-MANN, M. (1998): *El quark y el Jaguar. Aventuras de lo simple y lo complejo*, Barcelona: Tusquets. Cuarta edición en español.
- KAPITZA, P. (1985): *Experimento. Teoría. Práctica. Artículos y conferencias*, Moscú: Mir.
- MATHUR, H.; K. BROWN y A. LOWENSTEIN (2016): «An Analysis of the LIGO Discovery Based on Introductory Physics», *American Journal of Physics*, vol. 85, n.º 9, pp. 676-682.

- MITJANS, A. (1990): *La creatividad como proceso de la personalidad*, Universidad de La Habana.
- MOREIRA, M. A.; I. M. GRECA y M. L. RODRÍGUEZ (2002): «Modelos mentales y modelos conceptuales en la enseñanza/aprendizaje de las ciencias», *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, vol. 2, n.º 3, Porto Alegre, pp. 37-57.
- VALDÉS CASTRO, PABLO y ROLANDO VALDÉS CASTRO (2004): *Tres ideas básicas de la didáctica de las ciencias*, *Didáctica de las Ciencias. Nuevas perspectivas*, La Habana: Pueblo y Educación.
- YOUNG, H. D. y R. A. FREEDMAN (2009): *Física universitaria*, t. 1, México D. F.: Paerson Education. Duodécimo segunda edición.



Reflexiones sobre el Programa de Física General para carreras de ingeniería en los planes de estudio E. Primeros resultados de las asignaturas impartidas

JUAN ANTONIO ALEJO DÍAZ,* JUAN JOSÉ LLOVERA GONZÁLEZ**

Introducción

En un trabajo anterior referimos cómo la convocatoria que realizó el Ministerio de Educación Superior (MES) a las Comisiones de Carrera de las universidades cubanas para analizar la factibilidad y viabilidad de disminuir la duración de las carreras de los cinco años establecidos a solo cuatro ha implicado un desafío enorme para estas comisiones, tal vez como nunca antes lo había representado ningún otro plan de estudio después de la reforma universitaria de 1962. Los elementos controversiales que se han generado también son inusualmente nuevos en relación con la discusión de planes de estudio de carreras universitarias en Cuba (Alejo, Cruz y Llovera, 2018).

Esta situación se propició, sobre todo, porque en los planes de estudio anteriores no existía la premisa de recortar contenidos en un 20 % del total anterior, sino que su diseño curricular solo se refería a seleccionar, actualizar, organizar, articular vertical y horizontalmente los contenidos de las disciplinas de las carreras. En los planes E, además de todo lo anterior, como una premisa insoslayable de cualquier diseño serio se encuentra la reducción significativa de los contenidos mencionada antes.

En nuestra universidad ya han pasado a la versión de los cuatro años algunas de las doce carreras que se imparten. De ellas reciben Física General (en lo adelante FG) once, pues se excluye la carrera de Arquitectura.

* Instituto de Ciencias Básicas, Departamento de Física, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cuba

El objetivo de este trabajo es abordar los resultados de los nuevos enfoques durante los dos primeros semestres de su aplicación en Física I y Física II.

Desarrollo

Reflexiones sobre Física I (Mecánica, Física Molecular y Termodinámica)

Física I se impartió en 11 facultades a aproximadamente 1 100 estudiantes del curso regular diurno (CRD), por un total de 25 profesores, distribuidos por categorías docentes en la forma que se presenta en la tabla 1.

Tabla 1. Composición del claustro que impartió Física I

CATEGORÍAS DOCENTES	CANTIDAD DE PROFESORES
Profesores titulares	3
Profesores auxiliares	2
Profesores asistentes	7
Instructores	1
Auxiliar Técnico de la Docencia (ATD)	2
Recién graduados adiestrados	10
Total del claustro	25

Como puede observarse, fue un claustro relativamente balanceado en su estructura piramidal.

La tabla 2 muestra los resultados de promoción obtenidos en la asignatura Física I, diseñada e impartida sobre la base de su concepción como tronco común a todas las carreras.

Tabla 2. Resultados porcentuales de promoción de la asignatura Física I (plan E, curso 2017-2018)

CARRERAS DE INGENIERÍA	PRIMERA CONVOCATORIA	CON TERCERA CONVOCATORIA INCLUIDA (FINAL)	DIFERENCIA PORCENTUAL
Mecánica	19 %	48 %	29 %
Hidráulica	17 %	44 %	27 %
Eléctrica	42 %	60 %	22 %
Civil	29 %	49 %	20 %
Geofísica	33 %	63 %	30 %
Biomédica	37 %	76 %	39 %
Metalurgia	12 %	46 %	34 %
Telecomunicaciones	47 %	84 %	37 %
Química	68 %	84 %	16 %
Automática	45 %	81 %	36 %
Industrial	50 %	86 %	36 %

Una comparación de los resultados obtenidos en la asignatura en la edición del plan C modificado (C') (curso 2007-2008) con la primera edición del nuevo plan E evidencia una diferencia notable de los resultados, según muestra la tabla 3.

Tabla 3. Comparación de resultados de promoción entre las primeras ediciones de los planes C y E

	PLAN C 07-08	PLAN E 17-18	$\Delta\%$	PLAN C 07-08	PLAN E 17-18	$\Delta\%$
Mecánica	42 %	19 %	-23 %	89 %	48 %	-41 %
Hidráulica	20 %	17 %	-3 %	75 %	44 %	-31 %
Eléctrica	38 %	42 %	+4 %	79 %	60 %	-19 %
Civil	32 %	29 %	-3 %	85 %	49 %	-36 %
Biomédica	28 %	37 %	+8 %	86 %	76 %	-10 %
Metalurgia	26 %	12 %	-14 %	90 %	46 %	-44 %
Telecomunicaciones	27 %	47 %	+20 %	86 %	84 %	-2 %
Química	33 %	68 %	+35 %	79 %	84 %	+5 %
Automática	33 %	45 %	+12 %	82 %	81 %	-1 %
Industrial	25 %	50 %	+25 %	86 %	86 %	0 %

Un análisis inicial de estos bajos resultados en la promoción –seguramente multicausales– permite identificar de manera inicial al menos cinco elementos que –entre otros– pueden haber incidido en tales resultados. Estos, en todas las carreras (exceptuando Ingeniería Química e Ingeniería Industrial), son inferiores a los obtenidos en el curso en que se aplicó la primera edición del plan C' (curso 2007-2008), cuando la asignatura estaba metodológicamente diseñada a partir de la concepción de un núcleo básico general, pero orientado a las necesidades de formación en Física propias de las diferentes carreras, con casi el mismo contenido y el mismo número de horas lectivas (80 horas/clase) que contempla el plan E. Los elementos identificados son los siguientes:

1. Es muy difícil uniformizar el trabajo docente, más aún por la diferente experticia que posee el colectivo de profesores que impartió la asignatura. Aunque cada colectivo formado por los docentes que impartían docencia en una misma carrera era dirigido por un profesor de categoría docente superior (auxiliar o titular) y todos ellos participaban en la concepción metodológica de la asignatura, no es posible homogeneizar de manera

satisfactoria su impartición para que los estudiantes enfrenten un examen final común diseñado por un profesor principal único que no puede estar al tanto de las singularidades del proceso docente de cada lugar y carrera.

2. Habitualmente se confeccionaban los temarios de Física I (y también los de Física II y Física III) por los diferentes profesores que lo hacían, de manera individual, con seis o hasta siete preguntas. Esta vez todos los temarios tuvieron cinco preguntas. Eso no significa que fueran «fáciles», pues en todos los casos revisaban asuntos esenciales de la asignatura. Enfatizamos, entonces, en que el número de preguntas se normalizó y variaron los estándares históricos fijados por los profesores principales de la asignatura en las diferentes carreras. Se limitó así la impronta que cada uno le daba al temario confeccionado para cada carrera teniendo en cuenta las singularidades del proceso en cada facultad.
3. Al elaborarse un examen común para todos los estudiantes, en cuyo diseño los profesores principales (PP) de cada facultad no tuvieron, por razones de compartimentación, decisiones finales, los estudiantes no realizaron un examen diseñado con los énfasis, estrategias y enfoques de los docentes que les impartieron la asignatura. Por demás, fueron confeccionados más de treinta temarios de exámenes finales en lo fundamental por un solo docente, y no es posible en esta situación garantizar un equilibrio estricto entre estos y una uniformidad de enfoques entre las tres convocatorias que por cada facultad se aplicaron.

Es conveniente precisar que se le pidió a un conjunto de profesores de experiencia que colaboraran con la entrega de un conjunto de preguntas y problemas bases para la confección del examen, pero su elaboración definitiva estuvo de forma exclusiva en las manos de un docente, y estos temarios fueron revisados por el segundo jefe del departamento. Comentario aparte puede hacerse del andamiaje organizativo que esto requirió: contabilizar los alumnos a examinar para imprimir los temarios necesarios por fechas de exámenes y movilizar los profesores a cuidar; pues se trata de que, si los exámenes se aplican en una misma semana, queden agrupados un mismo día, cuestión que fue posible solo de manera excepcional.

4. La descontextualización en relación con la carrera en la impartición de FG en ingeniería pudo producir una desmotivación en los estudiantes, con efectos indeseables en los resultados docentes. La forma de enseñar FG en los planes C y D vinculándola con el entorno existencial universitario del estudiante a partir de un enfoque afín a la especialidad y también de un enfoque CTSA (ciencia, tecnología, sociedad y ambiente) favorece un aprendizaje significativo (Ausubel, Novak y Hasnesian, 1983), aspecto relacionado de manera coherente con los elementos motivacionales y afectivos vinculados al proceso de enseñanza-aprendizaje (Castellanos, 2005). Esto lo alertábamos en el trabajo antes mencionado (Alejo, Cruz, y Llovera, 2018).
5. El distanciamiento entre los contenidos de FG y los de las disciplinas de la especialidad no favorece el aprendizaje significativo. Por el contrario, al quedar los elementos incluyentes que pudiera propiciar nuestra disciplina distantes en el tiempo y no ser conectados en anclajes cognitivos con elementos de las ciencias de ingeniería, queda limitado este tipo de aprendizaje.

Nuestras experiencias como profesores invitados en universidades de otros países y como participantes en eventos internacionales en América Latina nos han permitido constatar que los exámenes comunes a nivel de asignaturas universitarias de la forma en que los aplicamos nosotros no existen en esos ámbitos.

En un artículo a propósito de los cursos de FG en carreras de Ingeniería Mecánica y de su no uniformidad o unifromidad, dígase tronco común, Cabral, Castillo y Muñiz (2016) presentan un estudio comparativo realizado en varios institutos tecnológicos (universidades tecnológicas semejantes a la nuestra) sobre los programas de los temas de FG mencionados antes.

Es interesante constatar cómo en cada uno de los institutos los enfoques y el tratamiento de estos temas tienen singularidades propias a pesar de que se refieren a la misma ingeniería en institutos tecnológicos afines de un mismo país. Algunas de las más representativas se mencionan a continuación:

1. En una de estas universidades tienen un curso obligatorio de Física Clásica en el primer semestre, y se argumenta que de

ello dependen los éxitos o fracasos posteriores en FG. Notemos que este no es un curso propedéutico, sino más bien un curso de Física Básica Universitaria que servirá de preparación para cursos posteriores.

2. En otro caso, el curso de Dinámica está repartido en dos semestres, pues el primero se encuentra consagrado a la Cinemática y Dinámica de la Partícula, y a los Teoremas de Trabajo-Energía, Conservación de la Energía y del Momento Lineal.
3. Finalmente, existe una diferencia entre la cantidad de horas en los planes de estudio de estos institutos para los contenidos de Mecánica. Es conveniente observar que los cursos de primer semestre de Física Universitaria son solo de Mecánica y no se incorpora dentro de sus contenidos la Física Molecular y la Termodinámica, como se hace en el caso nuestro, situación que añade complejidad al semestre, dado su presupuesto de horas. Sin embargo, algunos de estos cursos en las universidades tecnológicas mencionadas tienen un número de horas superior a las 80 que tiene nuestro semestre.

En Cuba las Comisiones Nacionales de Carrera realizan el diseño curricular de forma general para todas las universidades del país, independientemente de que cada una de ellas puede tener singularidades territoriales; no obstante, los Colectivos de Carrera de los centros tienen algunas pequeñas holguras para acomodar estos currículos. Cuando se aplicaban los planes C y D, su especificidad hacía menos significativas estas particularidades; sin embargo, ahora con el tronco común de la FG en los planes E estas pueden ser más significativas pues en lo «universal» del nuevo programa la distancia que existe entre este y las particularidades territoriales de las carreras debe ser mayor.

Como puede verse en el artículo citado, existe una tendencia en el diseño curricular a que una misma carrera tenga sus particularidades, más allá de las coincidencias razonables.

Debido a las características diversas de las carreras de ingeniería que abarca nuestro plan E es razonable también tener un por ciento de contenidos dentro de la generalidad de estos planes particularizados en función de cada una de ellas.

Esto, además, permitiría acercar más las asignaturas, por la situación que se refirió antes, a las singularidades territoriales, pues ese por ciento pudiera dejarse en manos de los Colectivos de Carrera de dichos centros.

Sería interesante también analizar, en relación con los resultados de promoción en este primer semestre de Física Universitaria, la introducción en el período vacacional previo al ingreso a la universidad de un curso propedéutico, teniendo en cuenta al deficitario curso de Física que recibe el estudiante durante su enseñanza media y la ausencia de examen de ingreso de esta asignatura, por lo que estudiantes y centros de estudio no se ven presionados a realizar un esfuerzo sistemático en el estudio y/o la impartición de esta disciplina.

Asignaturas de FG en los planes de las diferentes carreras de ingeniería

La tabla 4 muestra los semestres de FG que cada comisión de carrera escogió para sus planes de estudio.

Tabla 4. Semestres de FG seleccionados por las comisiones de carreras para los planes de estudio

INGENIERÍA	PROGRAMA DE FG VINCULANTE A LA CARRERA
Telecomunicaciones y Electrónica	3 semestres
Química	3 semestres
Mecánica	3 semestres
Metalurgia	3 semestres
Civil	2 semestres
Hidráulica	2 semestres
Geofísica	3 semestres
Automática	2 semestres
Eléctrica	2 semestres
Biomédica	3 semestres
Industrial	2 semestres
Informática	No se imparte

Es interesante observar cómo carreras de perfil eléctrico (Eléctrica, Automática, Telecomunicaciones y Biomédica) han tenido percepciones diferentes de los semestres de FG que necesitan. En general, las carreras que optaron por impartir solo dos semestres de FG renunciaron a los contenidos de Física Cuántica, cuestión que resulta para nosotros poco comprensible si se visualiza el engarce de estas temáticas con desarrollos impetuosos y actuales de tecnologías de vanguardia que se insertan rápidamente en las improntas de las ingenierías modernas.

Sin embargo, es probable que de no existir el tronco común pudiera haberse diseñado una FG específica para cada una de estas carreras en

los dos semestres en los que acomodaron FG, en alguno de los cuales hubiera sido posible incorporar elementos de Física Cuántica.

Consideramos un retroceso en la calidad del diseño curricular de FG para ingeniería renunciar a los contenidos de Física Cuántica siguiendo las indicaciones de los Colectivos de Carrera que tomaron esta decisión, tal vez por la necesidad de economizar horas al reducirse la carrera a cuatro años y no tanto por una valoración equivocada de la significación de estos temas.

Reflexiones sobre la Física II (Electromagnetismo y Óptica) en la versión de tronco común

La composición del claustro que impartió Física II en el curso 2018-2019 es semejante a la del que impartió Física I en el curso 2017-2018. Esta composición se mostró en la tabla 1. De manera análoga, el número de estudiantes, aunque descendió en algunas carreras, es semejante al del semestre anterior.

Una comparación de los resultados obtenidos en la asignatura en la edición del plan C modificado (C') (curso 2007-2008) con la primera edición del nuevo plan E muestra los resultados que se presentan en la tabla 5.

Tabla 5. Comparación de resultados de promoción de Física II entre las primeras ediciones de los planes de estudio C y E

CARRERAS DE INGENIERÍA	CONVOCATORIA ORDINARIA		
	PLAN C 2008-2009	PLAN E 2018-2019	$\Delta\%$
Mecánica	36 %	56 %	+20 %
Eléctrica	32 %	32 %	0,0 %
Civil	37 %	44 %	+7,0 %
Metalurgia	29 %	48 %	+19 %
Telecomunicaciones	30 %	44 %	+14 %
Biomédica	30 %	52 %	+22 %
Química	26 %	65 %	+39 %
Automática	24 %	32 %	+8,0 %
Industrial	38 %	38 %	0,0 %
Hidráulica*	29 %	...	...

* En esta carrera la asignatura corresponde al sexto semestre, por lo que se impartía en el momento de elaborar este trabajo.

Estos resultados nos motivan a hacer las siguientes reflexiones:

1. De forma similar a los resultados alcanzados en Física I, en la cual en cuatro carreras la promoción se incrementó por encima del 10 % de un plan al otro, puede observarse que la promoción se incrementó en el examen ordinario (primera convocatoria) en cinco carreras en más de un 10 % también, en tanto en el resto o se incrementó ligeramente o no varió. En ningún caso el resultado fue inferior al obtenido en la primera edición del plan C modificado (C'). En dos de las carreras no se evidencia cambio en la promoción. Sin embargo, los porcentajes de promoción aún son bajos, de manera que los incrementos promedios de un 6,0 % para la Física 1 y de un 14 % para la Física 2 no se pueden considerar indicadores de mejora evidente en la efectividad del nuevo plan.
2. Para valorar estas diferencias aparentes en favor de la Física II no se puede obviar que, una vez cursada Física I, una considerable cantidad de estudiantes causan baja o repiten el año, por lo que la matrícula real es menor en Física II, y de la cohorte de estudiantes, –la misma en cada semestre en ambos planes–, permanecen en las aulas aquellos que han mantenido un mejor rendimiento académico. Debe considerarse, además, que después de cursar Física I, haber acumulado más experiencia como estudiantes universitarios, y ante los bajos resultados obtenidos, los estudiantes en general dedican más atención y estudio a Física II.
3. Al analizar en el nuevo plan E las carreras con más bajo índice de promoción en Física I (Civil, Mecánica y Metalurgia) se aprecia que estas obtienen incrementos apreciables de sus promociones respectivas en Física II, lo cual puede ser consecuencia de lo analizado anteriormente relativo a las reducciones de matrículas al pasar de una año al siguiente.
4. En el caso de la Ingeniería Química, los resultados de Física II y II en el plan E son casi coincidentes, lo que podría explicarse por ser esta la única carrera que realiza sus exámenes de forma oral en ambas asignaturas, muy bien estructurados y aplicados desde hace varios años, por lo que resulta una interesante experiencia a tomar en cuenta para su posible generalización en un futuro.
5. Física II es la asignatura de mayor complejidad de las tres que puede incluir la disciplina. Ante los bajos resultados de carácter histórico que tuvo la asignatura precedente, Física I,

la preparación metodológica previa y las evaluaciones de Física II que se hicieron para su edición en el nuevo plan de estudio E se realizaron con mucho detalle y esmero, aun cuando ni los cambios en los contenidos, ni en los objetivos, ni en el sistema de evaluación fueron tan relevantes respecto a los realizados en Física I.

Comparemos ahora nuestro curso de Física II en la versión de tronco común con cursos de Electromagnetismo en carreras universitarias en otros países. Es necesario recordar que los contenidos fundamentales de Física II son precisamente los temas de electromagnetismo.

No es usual encontrar la FG en un tronco común en universidades tecnológicas con una diversidad significativa de carreras de ingeniería similares a la nuestra. Lo que se encuentra con este enfoque curricular es una FG común, pero por grupos de carreras afines. En efecto, en ellas existe un llamado tronco general (común) en cada uno de sus programas, sin embargo, no es el mismo para todas estas. Existe un tronco general de un tipo para algunas de las carreras de la lista y otro común para otras. Este es el caso, por ejemplo, de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) en México (Instituto Tecnológico de Aguascalientes, 2010).

Una situación semejante ocurre cuando se pesquisa sobre la enseñanza del Electromagnetismo en carreras de ingeniería. En particular, el agrupamiento es muy marcado en las que por alguna razón tienen necesidad de profundizar en esos contenidos. Este es el caso en un grupo de institutos tecnológicos mexicanos (Universidad de Chile, s. f. b) con una asignatura común de Electromagnetismo que poseen las carreras de Ingeniería Eléctrica, Ingeniería Mecatrónica, Ingeniería Mecánica, Ingeniería Bioquímica, Ingeniería Electrónica, Ingeniería en Nanotecnología, Ingeniería en Energías Renovables e Ingeniería Biomédica. Nótese que todas no son carreras de perfil eléctrico en específico, sin embargo, aunque se reúnen en su totalidad bajo este nominativo, se manifiesta la tendencia a agrupar por necesidades similares en relación con estos temas de la FG.

Otra tendencia que se observa es la de fundir carreras creándoles objetivos mixtos y definir para estas cursos de Electromagnetismo propios. Este es el caso de la carrera de Ingeniería Civil Industrial impartida por una universidad chilena (Universidad de Chile, s. f. a).

La misma situación ocurre con la carrera de Ingeniería Civil Eléctrica de ese mismo país (Universidad de Chile, s. f. a).

La especificidad de los cursos de Electromagnetismo inclusive puede darse dentro de las propias carreras: Electromagnetismo para Ingeniería de Alimentos, Ingeniería en Electrónica, Ingeniería en Sistemas Eléctricos de Potencia, Ingeniería en Telecomunicación e Ingeniería Industrial, y un curso de Electromagnetismo Aplicado que se imparte principalmente en Ingeniería Eléctrica (Universidad Católica de Uruguay, s. f.).

El tronco común en la enseñanza del Electromagnetismo y la Óptica (Física II en nuestro caso) crea contradicciones que pueden enmarcarse en las siguientes interrogantes:

1. ¿Es factible conciliar la impartición igual de estos contenidos para carreras cuyos intereses en estas temáticas son tan disímiles como la Ingeniería Industrial y la Ingeniería Eléctrica?
2. ¿Cómo buscar la articulación vertical entre Física II que es antecedente de la asignatura Teoría del Campo Electromagnético, impartida en Ingeniería en Telecomunicaciones y Electrónica, si los contenidos de la primera se ajustan a un formato común y necesariamente limitado en contenidos propios de esta parte de la Física?
3. ¿Cómo evitar la duplicidad y repetitividad de contenidos en relación con los circuitos eléctricos que ocurrirá en las carreras del perfil eléctrico cuando la asignatura Física II y la asignatura de Circuitos Eléctricos aborden en un mismo semestre, cada una según sus programas, la misma temática en relación con los Circuitos RC, RL, LC, LRC?
4. ¿No requerirán los futuros ingenieros civiles una preparación básica más sólida en temas de mecánica y menos en temas de electromagnetismo que los ingenieros en telecomunicaciones y viceversa?

Estas preguntas, opinamos, no tienen respuestas en el marco estricto de un programa común de la FG actual en los planes de estudio E para ingeniería.

Pensando en el plan

Existen un grupo de aspectos positivos remarcables en este nuevo plan de estudio de la FG. Pero hay otros aspectos que pudieran

analizarse con vistas a su modificación y que ya hoy, a nuestro juicio, deben tenerse en cuenta para una fecha, quizás no tan lejana, en la que comenzará a pensarse en los planes de estudio

Un aspecto muy positivo fue mantener en la mayoría de las carreras la Física Cuántica en el programa. La ausencia de estos contenidos es un retroceso en el completamiento de los cuadros físicos que el estudiante debe incorporar en su formación científica para visualizar la materialidad del mundo natural. Por otra parte, como ya mencionamos, la ausencia de estos contenidos en la FG en otras carreras provocará dificultades para comprender los fundamentos de tecnologías actuales que en el día a día de su vida común y profesional tendrá que utilizar el egresado de estas carreras.

Esta situación origina una desactualización y ausencia de completitud en su formación profesional notables, pues la preparación en Física que le proporciona la universidad queda limitada a los años finales del siglo XIX, es decir, tiene un siglo y veinte años de retraso. Este aspecto, creemos, requiere una urgente reflexión por las comisiones nacionales de carreras en las que estos temas fueron excluidos del programa actual de la FG.

Otro asunto a considerar es la total homogeneidad de los contenidos. Estos pueden ser individualizados en algún porcentaje para que se acerquen más a los currículos de las carreras, y así lograr una motivación mayor y tender a un aprendizaje de la FG con mayores elementos incluyentes y vinculación con la especialidad.

Por último, la idea de una estrategia de tronco común para la FG no tiene que conllevar necesariamente la concepción de un examen final único común. Se debe propiciar que los estudiantes se enfrenten a exámenes confeccionados por los profesores principales de cada facultad diseñados según las pericias y puntos de vista de los docentes que les impartieron la asignatura. Estos, por supuesto, se uniformizan como está orientado a través de la dirección del departamento o de un profesor principal general de la asignatura, que puede seguir fungiendo y atendiendo el proceso docente-educativo en la misma en su formato de tronco común por especialidades afines en toda la universidad.

Eliminar los exámenes finales comunes, además, tributaría a una simplificación organizativa en su aplicación.

Esta decisión de examen común puede resolverse con una nueva mirada y reflexión al asunto, sin tener que esperar por los futuros cambios de planes.

Conclusiones

Los planes de estudio E de la educación superior cubana, en el caso de las carreras de ingeniería, establecen para la disciplina de FG un tronco común para todas las carreras en las que la Universidad Tecnológica de La Habana es centro rector. Esto es un elemento modificador importante, con seguridad mucho más que algunos otros elementos que estuvieron presentes en planes de estudio anteriores.

En el caso del plan de estudio de la disciplina FG para las ingenierías, mantener un presupuesto de horas lectivas rebajado solo ligeramente con relación al plan de estudio anterior representa una significativa comprensión por parte de las carreras de la utilidad de esta ciencia para entender los fundamentos de las ciencias técnicas.

Haber conservado de manera general los contenidos que explicitan los cuadros físicos del mundo natural es un hecho remarcable. Sin embargo, que se haya reducido a dos semestres la impartición de la FG en algunas carreras y se hayan eliminado los contenidos de Física Cuántica, en nuestra opinión, es un desacierto en el contexto actual y futuro de las tecnologías de todo tipo.

Los resultados docentes de Física I pueden estar influenciados, entre otras variables, por una cierta descontextualización de la FG con respecto a la especialidad de ingeniería que la recibe, debido a la decisión de establecer un currículo común para todas las carreras de ingeniería, lo que influye en la disminución de elementos motivacionales e incluyentes que limitan la significatividad del aprendizaje. Adicionalmente, un examen final común aleja a los estudiantes de un examen diseñado con los énfasis, estrategias y enfoques de los docentes que le impartieron la asignatura.

El tronco común en la enseñanza del Electromagnetismo y la Óptica, en nuestro caso, crea contradicciones que deben tenerse en cuenta para perfeccionar su impartición en el futuro. Un análisis más completo podrá hacerse al concluir el examen extraordinario de fin de curso en esta asignatura.

Bibliografía

ALEJO, J. A.; J. CRUZ y J. LLOVERA (2018): «Algunas consideraciones sobre el programa de Física General para carreras de Ingeniería en los Planes de estudio E», *Revista Cubana de Física*, vol. 35, n.º 1E, pp. E52-E53.

- AUSUBEL, D.; J. NOVAK y H. HASNESIAN (1983): *Psicología Educativa. Un punto de vista cognoscitivo*, México D. F.: Editorial Trillas. Segunda edición.
- CABRAL, L. G.; A. CASTILLO y M. A. MUÑIZ (2016): «Estudio comparativo de 4 tendencias curriculares en torno a la física, en la formación de ingenieros en México: el caso institutos tecnológicos, FI-UNAM, IPN, UAM-A», ponencia, Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI, Centro de Convenciones Cartagena de Indias, 4-7 de octubre.
- CASTELLANOS, D. (2005): *Estrategias para promover el aprendizaje desarrollador en el contexto escolar*, La Habana: Educación Cubana e Instituto Pedagógico Latinoamericano y Caribeño (IPLAC).
- INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AGUASCALIENTES (2010): «Reunión nacional de implementación curricular y fortalecimiento curricular de las asignaturas comunes por área de conocimiento para los planes de estudio actualizados del SNEST», Aguascalientes.
- UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA (UAM) (s. f.): «Licenciaturas y carreras en orden alfabético», México D. F.
- UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL URUGUAY (s. f.): «Cursos. DNAT», <<https://ucu.edu.uy/es/dnat/cursos>> [29/8/2018].
- UNIVERSIDAD DE CHILE (s. f. a): «Ingeniería Civil Eléctrica», <<http://www.uchile.cl/carreras/4972/ingenieria-civil-electrica>> [29-8-2018].
- UNIVERSIDAD DE CHILE (s. f. b): «Ingeniería Civil Industrial», <<http://www.udla.cl/portales/tp9e00af339c16/uploadImg/File/malla/ing-civil-industrial-ep.pdf>> [29/8/2018].



Importancia de la mecánica de los fluidos en las carreras ingenieriles

YAMELKA HERRERA HERNÁNDEZ,* ANA MARÍA BONNIN GARCÉS,* ROLANDO SERRA TOLEDO*

Introducción

La mecánica de fluidos es la parte de la física que se ocupa de la acción de los fluidos en reposo o en movimiento. Esta puede subdividirse en dos campos principales: la estática de fluidos o hidrostática, que se ocupa de estos en reposo, y la dinámica o hidrodinámica de los fluidos, que los estudia en movimiento.

Un fluido es el estado agregativo de la sustancia que no puede mantener equilibrado un esfuerzo cortante por tiempo alguno. Los fluidos desempeñan un papel crucial en muchos aspectos de la vida cotidiana. La mecánica de fluidos es fundamental en campos tan diversos como el de la aeronáutica, la ingeniería industrial, las construcciones navales, la ingeniería civil, la biomédica, la ingeniería mecánica, la hidráulica, la ingeniería química, entre otros.

Es por ello que resulta de gran importancia incluir un tema de mecánica de los fluidos dentro de la disciplina Física en los primeros años de las carreras de Ingeniería en la Universidad Tecnológica de La Habana en el nuevo plan de estudio, conocido como plan E, pues no se impartía en la mayoría de las carreras de los planes anteriores.

Desarrollo

En la Universidad Tecnológica de La Habana la disciplina Física ha transitado por varios planes de estudio, como el plan C, D y otros anteriores. En estos no se contemplaba el tema de mecánica de los

* Instituto de Ciencias Básicas, Departamento de Física, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cuba.

fluidos en algunas carreras de ingenierías, porque existía una disciplina que contenía esta asignatura, por ejemplo, en las carreras de Ingeniería Hidráulica y Mecánica; sin embargo, en otras como Biomédica, Industrial y Automática se impartía tanto la estática como la dinámica de los fluidos, y en Ingeniería Química solo se trataba el tema de estática. Por eso podemos decir que la enseñanza de la mecánica de los fluidos, impartida desde la enseñanza de la Física en las diferentes ingenierías, ha merecido una atención limitada.

La disciplina Física se imparte en primero y segundo años, con las asignaturas Física I (Mecánica y Termodinámica), Física II (Electromagnetismo y Óptica) y Física III (Física Moderna), en once carreras (Telecomunicaciones, Automática, Eléctrica, Química, Civil, Geofísica, Hidráulica, Biomédica, Mecánica, Metalurgia e Industrial).

En los planes C y D Física I comenzaba en el segundo semestre de primer año con los siguientes temas:

- Las leyes de Newton
- Trabajo y energía
- Oscilaciones y ondas
- Física molecular y termodinámica.

Es una asignatura básica en este semestre si tenemos en cuenta las principales dificultades del proceso de enseñanza-aprendizaje de la Física en la enseñanza media. Algunas de estas dificultades son:

- Poca motivación.
- Poca comprensión de los principios, leyes y conceptos que se estudian y tratamiento insuficiente de algunos temas.
- Habilidades experimentales y de observación muy limitadas.
- Muy poca utilización de medios de enseñanza.
- No se analizan al nivel requerido las aplicaciones en la práctica profesional y en la vida cotidiana.
- No se realizan exámenes de ingreso de física en las ingenierías.

En los planes C y D en todas las carreras se lograba superar las deficiencias de la enseñanza media en esta asignatura, pues se conseguía que los estudiantes adquirieran un modo de pensar ingenieril desde el punto de vista de la Física y que pasaran a las demás asignaturas de la disciplina mejor

preparados. Pero había un hueco en algunas carreras: la falta de un tema importante para los ingenieros, que es la mecánica de los fluidos.

A partir del curso 2017-2018 comenzó en la Universidad Tecnológica de La Habana el nuevo plan de estudio, conocido como plan E, con un tiempo de duración de cuatro años. Todas las carreras reciben las asignaturas básicas, entre ellas las asignaturas de la disciplina Física, comunes para todas las ingenierías en materia y horas, independientemente de la especialidad. Hay que destacar que en los planes antes mencionados solo coincidían en número de horas, pero cada carrera desarrollaba los temas generales y a veces había una diferencia entre los objetivos según las especialidades.

Es entonces que el colectivo de profesores principales del Departamento de Física de nuestra universidad se dio a la tarea de identificar qué era lo común de este tema para las diferentes carreras, cuáles eran los objetivos principales que se debían definir desde la enseñanza de la Física, pues, como se mencionó antes, algunas carreras tienen en años superiores el tema de la mecánica de fluidos como disciplina.

Los temas a tratar en la asignatura en orden cronológico son:

- Las leyes de Newton
- Trabajo y energía
- Oscilaciones
- Ondas
- Mecánica de los fluidos
- Física molecular y termodinámica.

El tiempo dedicado al tema en el programa es de 4 horas/clase (una conferencia y una clase práctica). Como no formaba parte del contenido del curso en la mayoría de las carreras en los planes precedentes, el tema debió ser objeto de un tratamiento metodológico diferenciado por los profesores para lograr su mejor desarrollo en el curso, a fin de alcanzar buenos resultados en su impartición. Por otro lado, como precede al tema de termodinámica, se debe abordar con precisión lo relacionado con la presión barométrica y la presión manométrica para que no hayan imprecisiones en el siguiente tema de la asignatura. En el anexo I aparece el contenido del tema del plan analítico de la asignatura, dividido en sus objetivos, conocimientos y habilidades.

Sobre esta base, los profesores principales de la asignatura de cada una de las facultades confeccionaron los sumarios y objetivos particulares de las clases de conferencia y clase práctica, así como algunas de las orientaciones para estas.

El sumario de la conferencia contiene:

- Fluido como estado agregativo de las sustancias. Modelo fluido ideal.
- Modelo medio continuo. Magnitudes fundamentales de la hidrostática.
- Presión absoluta y presión manométrica. Barómetros y manómetros.
- Ley de Arquímedes. Fuerza de empuje y flotación.
- Flujo de fluidos en régimen laminar. Ecuaciones de continuidad y de Bernoulli.
- Aplicaciones de la mecánica de fluidos.

Los objetivos de la conferencia son:

1. Caracterizar cualitativa y cuantitativamente los fluidos y el modelo de fluido ideal empleando e interpretando las magnitudes fundamentales que los caracterizan.
2. Enunciar, formular e interpretar la ley de Pascal y el principio de Arquímedes estableciendo las magnitudes de que depende la fuerza de empuje y las condiciones de flotabilidad de los cuerpos en un fluido.
3. Caracterizar cualitativa y cuantitativamente el flujo de un fluido ideal en régimen estacionario laminar estableciendo las leyes fundamentales que lo rigen, y formulando e interpretando las ecuaciones de continuidad y de Bernoulli.
4. Ilustrar con ejemplos las aplicaciones más comunes de la mecánica de fluidos en la tecnología y en la vida cotidiana.

Para la clase práctica se definieron los siguientes objetivos:

1. Aplicar la ley de Pascal para resolver problemas relacionados con elevadores o prensas hidráulicas.
2. Calcular la presión hidrostática y la presión manométrica de un fluido ideal en reposo.

3. Aplicar la ley de Arquímedes para determinar las condiciones de flotabilidad de un cuerpo en un fluido.
4. Aplicar la ecuación de continuidad para calcular valores de velocidad del fluido y el gasto en función de las áreas del tubo de flujo.
5. Aplicar la ecuación de Bernoulli para calcular los valores y las variaciones de las presiones estática hidráulica y dinámica en un flujo de fluido ideal en régimen laminar.

Al finalizar la conferencia se deben poner ejemplos de aplicación de la mecánica de los fluidos en la vida cotidiana y tecnológica, tanto en forma general como en cada una de las carreras, que seguro se estudiaron en años anteriores.

1. Algunas aplicaciones en Ingeniería Mecánica

Veamos algunas de las aplicaciones en Ingeniería Mecánica (elegida por ser dos de los autores profesoras de esta especialidad):

- Los aerogeneradores de energía eólica para medir la velocidad del viento. El departamento del Centro de Estudios de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER) de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de La Habana desarrolla actualmente estos aerogeneradores. Este departamento es uno de los encargados del desarrollo de la energía renovable en nuestro país, y de las aplicaciones del medidor de Venturi y el tubo de Prandtl para medir la velocidad del viento en estos sistemas.
- El elevador hidráulico (figura 1): es una aplicación de la Ley de Pascal. Un pistón con área transversal pequeña A_1 ejerce una fuerza F_1 sobre la superficie de un líquido que pudiera ser aceite. La presión aplicada, p , se transmite a través del tubo conector a un pistón mayor de área A_2 (Sears *et al.*, 1996). El elevador hidráulico es un dispositivo multiplicador de la fuerza con un factor de multiplicación igual al cociente de las áreas de los pistones. Este dispositivo permite levantar grandes pesos ejerciendo pesas muy pequeñas, se toma como ejemplo un elevador hidráulico con un diámetro de 0,30 m; se puede conocer qué presión manométrica se necesita para levantar un coche de 1 200 kg (Sears *et al.*, 1996). También en la clase se puede hallar la razón entre el diámetro del recipiente bajo el auto y el

diámetro del recipiente donde se aplica la fuerza F_1 , de manera que el auto pueda ser levantado.

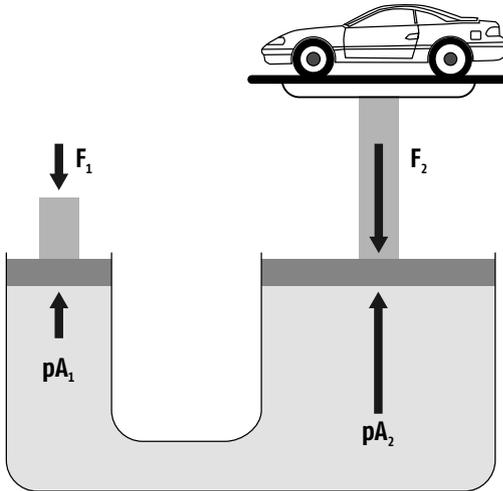


Figura 1. Elevador hidráulico.

- El cálculo de la rapidez de salida de gasolina por el fondo de un tanque de almacenamiento (Sears *et al.*, 1996). La rapidez de salida por una abertura a una distancia h bajo la superficie de un líquido es la misma que adquiriría un cuerpo al caer libremente una altura h . Este resultado es el teorema de Torricelli y es válido no solo para una abertura en la base de un recipiente, sino también para un agujero en una pared a una profundidad h bajo la superficie.
- La presión dentro de un neumático; si es igual a la presión atmosférica, el neumático estará desinflado. La presión debe ser mayor que la atmosférica para poder sostener al vehículo, así que la cantidad significativa es la diferencia entre las presiones interior y exterior.
- El anticongelante permanente en los automóviles, que por lo general es una disolución de etilén glicol y agua. El punto de congelación de la disolución depende de la concentración de glicol y puede determinarse midiendo su gravedad específica. Tales mediciones se realizan en forma rutinaria en los talleres de servicio para automóviles usando un dispositivo llamado hidrómetro (Sears *et al.*, 1996).

- Las sillas de los dentistas, los gatos hidráulicos para autos, muchos elevadores, las grúas y los frenos hidráulicos, que también están basados en la Ley de Pascal.

Existen muchos ejemplos relacionados con la Ingeniería Mecánica, y también con otras carreras ingenieriles, que demuestra la importancia de haber incluido este tema en el nuevo plan de estudio.

2. Aplicaciones de la mecánica de los fluidos en otras ingenierías

La mecánica de los fluidos es aplicada a muchas ramas de la ciencia, a través de ella podemos entender numerosas situaciones que nos encontramos en la vida cotidiana, por ejemplo, cómo se sostiene una ventosa de frasco de vidrio, por qué los objetos flotan en el agua, por qué los barcos de acero flotan en el mar, el vuelo de los aviones, el movimiento de los fluidos en el sistema circulatorio y respiratorios, etc.

Permite comprender también el sistema circulatorio en el organismo humano. El flujo de sangre normal en la aorta humana es laminar, pero una alteración pequeña, como una patología cardíaca, puede hacer que el flujo se vuelva turbulento. La turbulencia hace ruido, por ello escuchar el flujo sanguíneo con un estetoscopio es un procedimiento de diagnóstico útil.

El Teorema de Bernoulli tiene múltiples aplicaciones: en la ingeniería hidráulica, industrial y hasta la aeronáutica. Entre estas aplicaciones tenemos la propulsión a chorro, las turbinas, los compresores y las bombas (Universidad Tecnológica de La Habana, 2017). La hidráulica estudia la utilización en ingeniería de la presión del agua o del aceite; en el caso de las turbinas, que sirven para el aprovechamiento de la energía de posición de los fluidos. Esta energía se transforma de energía potencial a mecánica, denotación de una máquina llamada «turbina», que a su vez mueve un alternador para generar energía eléctrica; el propio fluido aporta el excedente de energía para su aprovechamiento mediante una turbina. En la figura 2 se puede observar que el desnivel de la toma a la entrada proporciona una energía que hace girar la turbina y a través de un generador (alternador) obtenemos electricidad. Además, podemos hablar de los medidores de caudales y los contadores de consumo de un fluido, ya que nos permiten conocer la velocidad en una sección de la conducción.

La ecuación de Bernoulli también tiene aplicación en la biomédica; por ejemplo, en la medición de la presión arterial, la aplicación de presión de aire en los pulmones para la respiración artificial, el drenado de fluidos corporales a través de sondas, etc.

Conclusiones

La introducción del tema de mecánica de los fluidos en la asignatura Física I en nuestra universidad ha ayudado a los estudiantes a entender algunas aplicaciones básicas e importantes en la especialidad de cada una de las ingenierías desde los primeros años de sus carreras, tanto en aquellas en las que no se imparte la mecánica de los fluidos, como en las que reciben la asignatura, pues ya cuentan con las bases físicas para su mejor comprensión.

Anexo. 1. Plan analítico correspondiente al tema mecánica de los fluidos

TEMA	OBJETIVOS	CONOCIMIENTOS	HABILIDADES
Mecánica de los fluidos	<ul style="list-style-type: none"> • Caracterizar los fluidos teniendo en cuenta sus propiedades fundamentales. • Aplicar los principios de Pascal y de Arquímedes a la solución de problemas. • Explicar el rol de la fuerza de empuje del aire en la atmósfera. • Explicar los fenómenos neumáticos a partir del principio de Pascal. • Diferenciar entre los conceptos de presión absoluta y presión manométrica. • Caracterizar cuantitativamente la dependencia de la presión a la profundidad en un fluido. 	<ul style="list-style-type: none"> • Densidad, presión y fuerza de presión. • Modelo de fluido ideal. • Presiones atmosférica, absoluta y manométrica. • Principio de Pascal. • Fuerza de Arquímedes. • Presión hidrostática. 	<ul style="list-style-type: none"> • Resolver problemas sencillos sobre máquinas neumáticas. • Calcular la presión hidrostática en un fluido en función de la profundidad. • Explicar cualitativamente las condiciones de flotación de los cuerpos en los líquidos. • Explicar la influencia del empuje del aire en el peso de los cuerpos. • Calcular la fuerza de empuje sobre cuerpos en fluidos. • Resolver problemas sencillos aplicando las ecuaciones de continuidad y de Bernoulli.
	<ul style="list-style-type: none"> • Identificar y aplicar las ecuaciones fundamentales que rigen la dinámica de los fluidos en régimen laminar (la de continuidad y la de Bernoulli). 	<ul style="list-style-type: none"> • Régimen de flujo laminar y turbulento. 	
		<ul style="list-style-type: none"> • Ecuación de continuidad. 	

Anexo. 1. Plan analítico correspondiente al tema mecánica de los fluidos (cont.)

TEMA	OBJETIVOS	CONOCIMIENTOS	HABILIDADES
Mecánica de los fluidos		<ul style="list-style-type: none">• Razón de flujo de volumen (gasto volumétrico)• Ecuación de Bernoulli.	

Bibliografía

- SEARS, W. F. *et al.* (1996): *Física Universitaria*, volumen I, parte II. México D. F.: Pearson Educación. Novena edición.
- SERRA, R. (2004): «La utilización del holograma como medio de enseñanza y de educación social en Cuba a través del vínculo Investigación-Docencia-Extensión Universitaria», tesis de doctorado en Ciencias Pedagógicas, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana.
- UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA HABANA (2017): «Programa analítico de la asignatura Física I. Plan E», La Habana.
- VÁZQUEZ, N. R. (2011): «Aplicación de la Mecánica de Fluidos a la Ingeniería Petrolera», tesis de grado, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México D. F.



Una propuesta de innovación educativa en la enseñanza-aprendizaje de la Física: impactos y retos

RAFAEL GARCÍA CAÑEDO,* ANÍBAL ISAAC SILVA,** SILVIA MIRIAM PELL DEL RÍO***

Introducción

Desde los años sesenta la enseñanza de la Física ha venido experimentando cambios en su concepción didáctica, que van desde el aprendizaje por descubrimiento, el constructivismo, entre otros, en aras de transformar la enseñanza tradicional y adecuarla a nuestros tiempos.

La enseñanza tradicional de la Física está centrada en el maestro, que desempeña un rol activo en todo el proceso, ejerce todo el tiempo la autoridad y obstaculiza la plena comprensión de los contenidos que se imparten. El profesor asume que conoce los preconceptos de los estudiantes y se monta en ellos para introducir los temas. Imparte así una conferencia magistral; cree que dando solución a los ejercicios en su explicación propicia el aprendizaje, y que en clase práctica se consolidarán los conocimientos. Esto trae como consecuencia un acomodamiento por parte de los estudiantes, que constituye una limitación, pues solo reproducen lo que se les ha enseñado.

¿Qué influencia tiene esta forma de enseñar en los estudiantes desde el punto de vista axiológico? Es caldo de cultivo para la configuración personalógica de un individuo reproductor, pasivo, poco reflexivo, esquemático-rígido en la solución de problemas, consumidor de lo ya hecho, que acepta cualquier declaración del profesor como una verdad

* Departamento de Física, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cuba.

** Departamento de Ciencias Sociales, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cuba.

*** Cátedra Cubana en Ciencia, Tecnología, Sociedad e Innovación, Universidad de La Habana, Cuba.

indiscutible. En resumen, evita el esfuerzo y la tenacidad en pos de alcanzar de modo creador un objetivo.

¿Cómo se ha enfrentado esta situación? Transformando la enseñanza tradicional en aprendizaje activo y protagonista para potenciar al estudiante al máximo posible.

Este trabajo se orienta a explicar cómo impacta axiológica y socialmente la propuesta de innovación educativa empleada en el proceso de enseñanza-aprendizaje de la Física en los estudiantes de ingeniería de la Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría.

Desarrollo

En la enseñanza tradicional comúnmente ocurre que el maestro no le da al estudiante el espacio para que por sí solo elabore y comprenda un determinado contenido, impidiendo así la función de ente activo que le corresponde. Está claro que detrás de lo planteado se encuentra una situación de enseñanza-aprendizaje que compulsa al estudiante medio a una actuación pasiva y reproductiva.

1. Impactos en el proceso de formación del estudiante

¿Cómo impacta en el estudiante el aprender tradicionalmente la Física en cualquiera de los niveles de enseñanza hoy?

En la enseñanza tradicional de la Física también se intenta formar una concepción científica del mundo en el estudiante, para ello el sujeto debe movilizar sus recursos cognitivos de manera adecuada a fin de interiorizar los conceptos que regulen su conducta de forma correcta, pero el proceso de significación se da superficialmente y con poca solidez.

Con frecuencia estos conceptos no son tomados en cuenta por los estudiantes debido a la situación conformada en el proceso de enseñanza-aprendizaje, y no siempre logran establecer las relaciones entre el objeto de estudio, sus propiedades y las magnitudes que las caracterizan, de modo que elaboran explicaciones inadecuadas y se forman un cuadro físico errado del mundo que los rodea.

Se trabaja con elementos abstractos y profundos, como las expresiones fisicomatemáticas, pero si son tratados a un nivel superficial y pragmático eso genera mecanicismos mentales, esquematismos rígidos y transducciones por no quedar claras la significación física de dichas ecuaciones, así como las condiciones particulares del problema y las leyes que le dan origen.

Tal tratamiento impide un aprendizaje adecuado, que produce una vivencia de rechazo y, como consecuencia, no se alcanza el cumplimiento exitoso de los objetivos de la asignatura. Como el estudiante se ve obligado a utilizar los contenidos que ha interiorizado con superficialidad, no enfrenta la asignatura como proceso potenciador en su formación.

2. ¿Cómo se generan limitaciones a la innovación tecnológica en el proceso tradicional de la enseñanza-aprendizaje de la Física?

La limitación fundamental al proceso de innovación tecnológica consiste en que la enseñanza tradicional se encuentran fuera de época, porque no prepara a los estudiantes para que, una vez egresados, cumplan con su papel social.

Lo anterior se debe a que esta enseñanza separa los contenidos, las vías e instrumentos que le dieron origen, separa las habilidades, las acciones realizadas para la construcción de los conceptos y los conceptos mismos; los conocimientos quedan fragmentados, inconexos.

Como resultado, solo se hace énfasis en lo cognitivo y se obvia lo afectivo del aprendizaje. Se centra en el resultado sin tener en cuenta el proceso. No propicia la integración esencial para aplicarla en la solución de problemas.

Se acostumbra a considerar que los estudiantes podrían utilizar los conocimientos cuando los necesiten, aunque los hayan obtenido por una vía reproductiva, memorística, atomizada. No son pocas las veces que lo aprendido se olvida poco después del examen. Porque los conocimientos no se obtuvieron por un proceso activo de comprensión de las esencias ni lograron incluirlos en su estructura cognitiva para darles un sentido personal con el cual implicarse.

La educación en general contiene en su seno varias contradicciones esenciales que determinan en su resolución el tránsito o no hacia niveles superiores de modo que se convierten en impulsoras o en limitantes del proceso de innovación tecnológica; entre ellas se destacan las que se dan:

- a. Entre las demandas de la sociedad, que se expresan en las exigencias del maestro, y las capacidades que tiene el estudiante de darles cumplimiento a través de sus estrategias y estilos de aprendizaje. Con frecuencia no son coherentes con las nuevas metodologías que propone el maestro.

- b. Entre las formas históricas de *enseñar* y *aprender* frente a las nuevas formas de *aprender a aprender* que proponen las tendencias de innovación educativa y las políticas explícitas e implícitas en las instituciones, que siempre se dan bajo la presión contenido-tiempo.

La innovación educativa pasa también por las etapas de la adquisición, el aprendizaje, la adaptación y la difusión de la transferencia tecnológica. En torno a la relación interrogativa de esa transferencia, ¿dependencia o aprendizaje?, Armenteros y Vega (1999) plantean:

La importancia estratégica de la tecnología para la reanimación económica y consiguientemente el desarrollo del país en el contexto mundial actual, nos sitúa ante la necesidad de revalorizar la transferencia de tecnología como aprendizaje, como una vía importante para la adquisición no solo de capacidades productivas, sino sobre todo tecnológicas en el marco empresarial y nacional. (pp. 98-99).

Esta relación interrogativa promueve un debate en torno al problema de la complementariedad entre el proceso de transferencia tecnológica, que trae cuotas de dependencia con la casa matriz, y los desafíos del aprendizaje para alcanzar una capacidad endógena de innovación científico-técnica y, por tanto, formas propias de acceso al cambio tecnológico.

El proceso de transferencia tecnológica, resultado de los mercados de transacciones de tecnologías, configuró una situación de dependencia en los países de menor grado de desarrollo que difiere de la interdependencia tecnológica generada entre los países industrializados.

Tres elementos se destacan aquí:

1. La necesidad de revalorizar la transferencia tecnológica como aprendizaje, pues no hay transferencia efectiva sin innovación incremental.
2. La complementariedad entre el proceso de transferencia tecnológica y la creación de una capacidad científico-técnica propia, endógena. En ese sentido, la academia enfrenta un reto educativo permanente, que consiste en crear y alimentar el potencial creador endógeno.

3. Que el proceso de transferencia tecnológica configura una situación de dependencia, por lo que se debe formar a los profesionales para un desempeño creador innovador que nos permita separarnos y aportar con nuestras tecnologías.

3. Ciencia y tecnologías para la soberanía económica

«Tendremos que conquistar con inteligencia y tesón nuestro lugar en este mundo y nuestra independencia económica en condiciones difíciles, y solo lo lograremos con el apoyo de la ciencia y la tecnología» (Castro, 1991, p. 48). Esta frase consigna el lugar de los institutos de investigación, las universidades y las empresas de producción y servicios, principales actores del desarrollo de la ciencia y la innovación tecnológica, en la solución de los problemas económicos y sociales del país.

Desde mediados de los años noventa del siglo pasado, en Cuba, de manera urgente, ha ido ocurriendo un acercamiento entre la institución universitaria y los institutos de investigaciones, de modo que se acumula una rica experiencia a través de la formación posgraduada, la práctica laboral estudiantil y la colaboración en las investigaciones.

En la universidad el problema radica en dar una respuesta educativa a tono con una preparación teórico-práctica de aquellos estudiantes capaces de asumir, como autores, una capacidad científico-técnica endógena. De aquí en adelante se abren interrogantes de urgencia paradigmática: ¿cómo puede un estudiante formado con las limitaciones de la enseñanza tradicional ser autor temprano y eficiente de las futuras innovaciones tecnológicas que necesita el país? Es muy difícil sistematizar incluso la recalificación, y en gran medida queda en el terreno de la casualidad, en la probabilidad de autosuperación y en la digresión de un autcurrículo oculto.

No hay desarrollo científico técnico ni innovación socializada exitosa sin su sostén teórico y operacional fisicomatemático, independientemente de que una parte de sus realizadores y consumidores no sean expertos en el tema.

En síntesis, se imparte ciencia, pero el entrenamiento creador aún no es sistematizado, los recursos siguen siendo insuficientes para el universo de los educandos, por tanto, el número de sujetos con formación eficiente para un cambio tecnológico endógeno es bajo. Los esfuerzos realizados por la comunidad científica y pedagógica, en particular en lo que va de siglo, no pueden negarse, pero el ritmo de crecimiento de

un potencial científico en respuesta a las demandas del proyecto de desarrollo nacional a tono con las exigencias internacionales no alcanza la velocidad requerida. La generalización y sostenibilidad de una educación para y desde sujetos centrados en su autodesarrollo, consecuentes actores de la soberanía tecnológica del país, es todavía emergente.

4. Urgencia nacional de un nuevo cambio en la enseñanza-aprendizaje de la Física para ingenieros

Desde el diseño curricular para la formación del ingeniero se declara que la Física, como fundamento en la formación del pensamiento teórico y el del sistema de habilidades, es clave. La búsqueda de una formación integral implica generalizaciones esenciales, sin embargo, persisten insuficiencias en la clase y en el plan de entrenamiento para un dominio práctico metodológico en la solución de tareas de la profesión.

Los resultados de esta investigación y de la experiencia pedagógica aplicada en la Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría reafirman la necesidad de un nuevo cambio en la enseñanza-aprendizaje de la Física para ingenieros. Se pudo constatar la importancia de incrementar las iniciativas psicodidácticas y axiológicas para mejorar la configuración de sentidos y significados.

Se trata de incrementar la influencia de una innovación educativa en la enseñanza de la Física y, a la vez, de un fortalecimiento de la autoeducación como capacidad integradora de la personalidad del futuro profesional.

Es necesario un nuevo cambio en la enseñanza-aprendizaje de la Física para ingenieros que tenga como resultado permanente un proceso autorientador en la comprensión de fenómenos físicos y su aplicación en la solución de problemas de la ciencia y la técnica.

5. Valor metodológico del aprendizaje innovador de la Física en el estudiante de Ingeniería

¿Cómo propiciar la formación en las ciencias físicas del sujeto de la innovación en el campo de la ingeniería?

El futuro ingeniero debe comprender las esencias de los fenómenos físicos que pretende aplicar para resolver un problema que presenta la sociedad; debe, por lo tanto, tener en cuenta los principios físicos que serán utilizados como determinaciones del funcionamiento de la tecnología, preferentemente con recursos nacionales, con cambios tecnológicos pertinentes, factibles, rentables y éticos, para cumplir con su función social. Y para ello debe estar orientado con un pensa-

miento flexible, abierto a los cambios más audaces y comprometido con los principios éticos del bien humano con equidad.

A continuación se presenta el esquema orientador para la comprensión del objeto de estudio que se aplicó en la solución de un problema, en la experiencia pedagógica de la Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría. Este esquema es el instrumento fundamental de la experiencia, porque facilita la interrelación entre todas las invariantes del proceso de construcción del conocimiento y aprendizaje de la Física (figura 1).

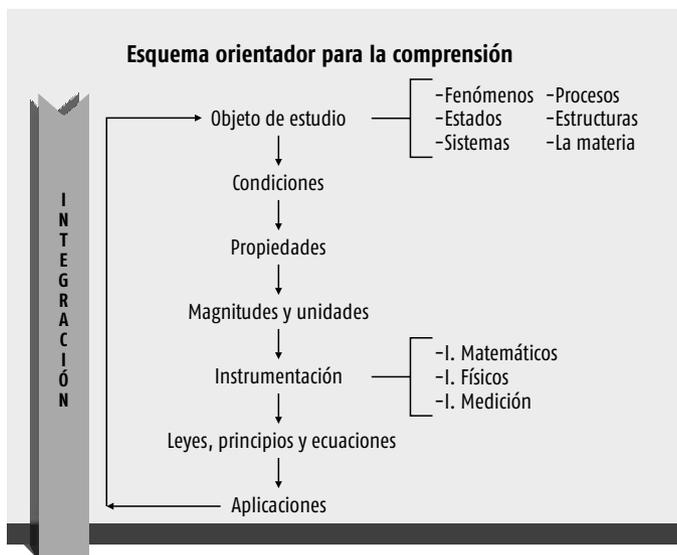


Figura 1. Esquema orientador para la comprensión.

En el esquema orientador el objeto de estudio se refiere al «qué», a lo concreto percibido, a la parte de la naturaleza que se estudia, las condiciones, a lo necesario para que ocurra, para que se dé el objeto de estudio, a su origen. Las propiedades van a la esencia pura o abstracta del objeto de estudio a través de la cual comienza el proceso de caracterización. Continúa el análisis y el desglose del despliegue de lo esencial y lo no esencial en las formas propias del fenómeno físico estudiado.

Se realiza posteriormente un proceso de comparación que permite la medición. Mediante la síntesis se definen los conceptos que designan las formas en que se expresan las propiedades por medio de la simbolización de magnitudes y unidades.

El «cómo» del proceso lo da la instrumentación y el «con qué», tienen una función relacional, de visualización representativa, por medio de la cual se conoce cómo se obtienen las ecuaciones físico-matemáticas; se comprende la relación singular entre las propiedades del objeto de estudio, que se constituye en una propiedad de dicho objeto, en una integración sintética esencial que se expresa en las leyes, ecuaciones y principios. El «para qué» de todo lo estudiado se precisa en las aplicaciones, que es lo concreto pensado.

Reestructuración del esquema en la resolución de problemas

El problema que se le propone al estudiante contiene toda la información necesaria. Los estudiantes tienen que saber identificar en él los elementos invariantes del esquema orientador de la comprensión para reorganizarlos, reestructurarlos y poder encontrar la solución (figura 2).

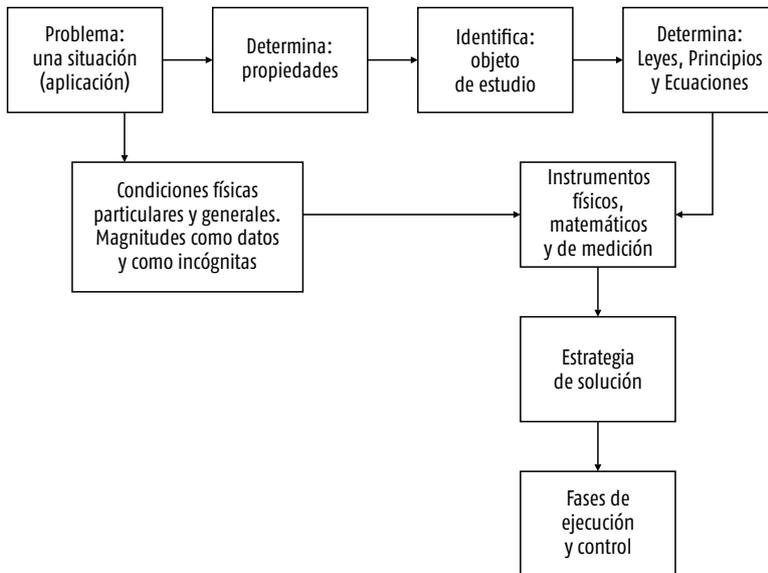


Figura 2. Esquema orientador para la resolución de problemas.

6. La esencia del cambio y la lógica de la experiencia pedagógica.

Fundamentos básicos de la innovación educativa

La esencia del cambio consiste en transformar la situación de enseñanza-aprendizaje y, por lo tanto, el proceso de enseñanza-aprendizaje, de forma que obligue a los estudiantes a ser activos y a construir un método

de análisis utilizando el esquema orientador, para mantener una tendencia innovadora en la calidad del aprendizaje, en cuanto este propicia el desenvolvimiento del pensamiento teórico crítico y propositivo.

De este modo se logra la conformación de hábitos a favor de la mejora constante de la calidad de la comprensión científica en formación, con la orientación del profesor, para así posibilitar la solución de problemas que crecen en complejidad, al aplicar lo aprendido con grados crecientes de independencia una vez que los estudiantes logran penetrar en las esencias del objeto de estudio.

La nueva situación de enseñanza-aprendizaje que se crea podemos definirla como una novedad en el recorte histórico (García, 2013), que se centra en un sistema de *actividad problémica-comunicación protagónica*. Es un sistema rectorado por el proceso de enseñanza-aprendizaje, estructurado con sus métodos específicos (innovación educativa y de dirección colegiada profesor-alumnos) para generar conflictos educativos inductores (inducción de crisis para generar soluciones educativas) de estados de necesidad de conocimiento, con interacciones propiciadoras de nuevas vivencias, debido a procesos grupales (situaciones de desarrollo, estados de cohesión e influencia, apoyo a los climas y atmósferas favorables al aprendizaje renovador) e individuales que favorezcan el cambio en la actitud ante la actividad de estudio.

Se trata de un sistema que implique la conformación y asunción de un papel protagónico en la búsqueda activa del conocimiento por parte del estudiante, la comprensión de la información y la resolución de problemas; que renueva el *debido rol orientador* del profesor para convertir la solución de las contradicciones objeto de estudio del proceso educativo como las mejores oportunidades de la conformación de un profesional integral.

La lógica de esta propuesta está dada por los momentos de la metodología que a continuación se mencionan:

- Primer momento: el profesor elabora con los estudiantes el esquema orientador.
- Segundo momento: ejecución del trabajo de laboratorio; los estudiantes observan y se enfrentan por primera vez con cierto grado de independencia a un hecho físico relacionado con un nuevo contenido. Con esto se activan los procesos del pensamiento al cuestionar y describir lo observado.

- Tercer momento: lectura de búsqueda haciendo uso del libro de texto u otra fuente de información.
- Cuarto momento: una vez en el aula, se dedican las dos primeras sesiones a la discusión de los aspectos teóricos.
- Quinto momento: se desarrolla en las próximas sesiones, consiste en la resolución de problemas en clases prácticas.
- Sexto momento: al finalizar la unidad de estudio, se construye un mapa conceptual y se integran los conceptos aprendidos estableciendo sus relaciones.
- Séptimo momento: evaluación del proceso a partir de los resultados que se obtienen.
- Octavo momento: el profesor, junto con los estudiantes, perfecciona la metodología aplicada para continuar mejorando los resultados.

7. Impactos de la propuesta innovadora aplicada en la enseñanza de la Física para ingenieros

La propuesta de innovación educativa aplicada permite, a partir de una nueva concepción didáctica, tener en cuenta los rasgos o requisitos que propician la innovación educativa, centrada en el aspecto creador y su necesaria articulación con un aprendizaje que debe ir de pasivo reproductivo a eficiente, activo y creador.

En las aplicaciones de la propuesta ya realizadas, el nuevo modelo genera vivencias positivas que propician el desarrollo del pensamiento teórico de los estudiantes en una edad fértil, configurando en ellos un aprendizaje eficaz. De esta forma, se alcanza la comprensión del objeto de estudio y su relación con el medio, para que puedan resolver problemas tanto teóricos como prácticos, al ser capaces de tener en cuenta las esencias en casos particulares y singulares.

La propuesta metodológica investigativa parte de cambiar la situación de enseñanza-aprendizaje de tradicional a activa para, de este modo, transformar el proceso docente educativo, sus componentes y categorías didácticas, propiciando el desarrollo del pensamiento teórico. Se propone, por tanto, un cambio en el sistema de actividad-comunicación entre los estudiantes, y entre los estudiantes y el profesor, con el fin de potenciar un cambio hacia un modelo de aprendizaje más activo y favorecer el desarrollo del sujeto.

En resumen, en la investigación se tiene en cuenta el hecho de que el hombre se desarrolla en medio de una situación histórico-cultural

concreta, y es sobre ella que hay que influir; es lo que se ha de transformar para inducir el desarrollo de los estudiantes.

En esta experiencia el grupo es orientado por el profesor, que no imparte la clásica conferencia magistral, sino que guía a los estudiantes apoyados en una base orientadora para las acciones (BOA) que permite la construcción del conocimiento, en función de lograr la comprensión que lleva a las esencias a fin de aplicarlas a la resolución de los problemas.

Durante todo el proceso se genera y se mantiene la curiosidad, el cuestionamiento de la realidad, el análisis crítico, la problematización y la elaboración de hipótesis, lo que propicia la adjudicación de sentido y significado a lo que están haciendo, y se mantiene la motivación en altos niveles para la ejecución de las tareas de estudio, cada vez con mayor independencia.

Esta nueva situación de enseñanza-aprendizaje crea condiciones para que el estudiante emplee como instrumento un esquema orientador, concepto utilizado por Galperin (1965) (citado por Talízina, 1988), que se adapta a la situación particular de la Física con el propósito de visibilizar y permitir relacionar todos los componentes invariantes para la construcción del conocimiento (figura 1). Influye en el logro de la independencia en el proceso de adquisición de los conocimientos, la toma de conciencia de sus límites.

En esta propuesta, desde el enfoque de las Ciencias de la Tecnología y la Sociedad (CTS), el instrumento –el esquema orientador– se puede considerar tecnología educativa porque fue elaborado con el objetivo de ser utilizado en la práctica como guía y orientación para que el estudiante, al emplearlo en su proceso de aprendizaje, pueda lograr la construcción de sus conocimientos; pero para ello no bastó la intención práctica, sino que fue necesario acudir a la ciencia para su elaboración y la fundamentación de su uso.

Lo planteado se corrobora en las definiciones de la técnica en su sentido lato; por ejemplo, en la siguiente: «el conjunto de procedimientos operativos útiles para ciertos fines prácticos. Son descubrimientos sometidos a verificación y mejorados por medio de la experiencia que constituyen un saber cómo que no exige un saber por qué». La tecnología es «Aquella forma (y desarrollo histórico) de la técnica que se basa estructuralmente en la existencia de la ciencia y tiene como rasgo característico un nivel de desarrollo de la técnica en alianza con la ciencia (Núñez, 2000).

Desde el enfoque (CTS), se puede plantear que lo que se hace con esta experiencia es «innovación», por consistir en el desarrollo y la generación de nuevos productos o procesos a partir de la aplicación de la tecnología; en este contexto de la educación se puede considerar una innovación educativa, en tanto se propone una nueva forma que reestructura y cambia el proceso de enseñanza-aprendizaje tradicional de la Física, para distanciarse de sus limitaciones.

Desde el punto de vista educativo pedagógico, la innovación educativa es definida por Jaume Carbonell (citado por Cañal de León, 2002) como:

[Un] conjunto de ideas, procesos y estrategias, más o menos sistematizados, mediante los cuales se trata de introducir y provocar cambios en las prácticas educativas vigentes... Su propósito es alterar la realidad vigente, modificando concepciones y actitudes, alterando métodos e intervenciones y mejorando o transformando, según los casos, los procesos de enseñanza y aprendizaje. La innovación, por tanto, va asociada al cambio y tiene un componente –explícito u oculto– ideológico, cognitivo, ético y afectivo. Porque la innovación apela a la subjetividad del sujeto y al desarrollo de su individualidad, así como a las relaciones teoría-práctica inherentes al acto educativo. (pp. 11-12).

Juan Escudero (citado por Pascual, 1998), por su parte, afirma que «hablar de innovación educativa significa referirse a proyectos socio-educativos de transformación de nuestras ideas y prácticas educativas en una dirección social e ideológicamente legitimada, y que esa transformación merece ser analizada a la luz de criterios de eficacia, funcionalidad, calidad y justicia y libertad social» (p. 86).

La metodología aplicada es innovación educativa, porque está dirigida a contribuir a la solución de problemas educativos que afectan la calidad de los aprendizajes de los estudiantes, proponiendo nuevas alternativas y como resultado de un cambio en la concepción didáctica que trae como consecuencia una metodología diferente empleada en el proceso de enseñanza-aprendizaje de la Física.

8. Impacto de la propuesta en las distintas dimensiones y componentes interactuantes en el sistema que se trata de transformar

El método propuesto, al romper con la enseñanza tradicional, provoca ansiedades, resistencias, ataques y estadios de crisis que conducentes

a giros, a cambios que reestructuran las vivencias interiores, que son la unidad central de análisis de la situación social del desarrollo de los estudiantes. Estos tendrán que cambiar su concepción del proceso de aprendizaje y convertirse en entes más activos.

En esta forma diferente de enseñar y aprender, el profesor desempeñará una función conductora y orientadora del proceso; no el clásico papel principal, centrado en la transmisión de información a que se acostumbra en la enseñanza tradicional, en la que concentra en sí el poder, con el dominio del conocimiento. Al contrario, ocurre entonces una descentralización del poder y una dirección más democrática, en la que se tienen en cuenta las ideas, creencias y opiniones de los estudiantes para que rectifiquen sus posiciones y construyan con el rigor científico requerido sus conocimientos.

Desde lo afectivo se producen reacciones de resistencia a la nueva propuesta que generó estados de incertidumbre, que inducen ansiedad ante lo nuevo y desconocido, y pueden ser expresados en ataques al proceso de enseñanza-aprendizaje (novedoso en su esencia) en que se ven implicados.

Esta reacción es muy humana, si tenemos en cuenta que se trata de una propuesta en la que los estudiantes tienen que aprender algo nuevo de una manera nueva, que implica cambios en su estructura cognitiva, conceptual y conductual en su concepción del aprendizaje. Es por ello natural que se sientan incómodos, desorientados, y esto genera angustia, incertidumbres, miedos y crisis; son normales entonces los procesos negativos de destrucción y ataque a la propuesta.

Resulta lógico esperar reacciones adversas contra la propuesta en el proceso de aceptación e interiorización del nuevo método, que obliga al estudiante a estudiar y a esforzarse, con sistematicidad. Se rompe con un sistema que propicia la cómoda pasividad de recibir los conocimientos elaborados sin grandes esfuerzos, lo cual es una falacia por la poca solidez del aprendizaje.

Los estudiantes que tenían una motivación intrínseca alta, aunque expresaron algunas resistencias, mantuvieron la fe en la metodología aplicada, experimentaron la satisfacción de los buenos resultados. Reconocieron sus límites al enfrentarse con independencia al conocimiento haciendo uso del esquema orientador, acudieron, dado el caso, al profesor y a los otros, de modo que se desarrolló en este contexto la solidaridad. Una vez logrado el aprendizaje con mayor independencia, esto les elevó su autoestima

como estudiantes al sentirse capaces de aprender de manera independiente.

En el proceso de construcción del conocimiento estos estudiantes dieron el salto cualitativo durante su aprendizaje, mostrando desarrollo en su pensamiento teórico, lo que les permitió el logro de un aprendizaje eficaz. Y algunos aplicaron la metodología propuesta en otras asignaturas, en las que les fue posible evidenciar la propiedad de la transferencia como valor agregado de la metodología propuesta.

Esto se debe a que en todo momento la propuesta dialoga con el estudiante y le dice: «tú sí puedes», «tú eres capaz de avanzar por ti mismo, de lograr mucho más de lo que hasta ahora te han permitido». Es una forma de darle confianza y de hacerlo consciente de que es responsable de su proceso de autodesarrollo en su ontogénesis personal evolutiva. Se da de esta manera una relación sujeto-sujeto sobre sí misma, pues no es solo entre los sujetos, sino que se pone al sujeto a interactuar consigo mismo y a potenciarlo hasta que necesite del apoyo del otro, que puede ser un igual o el profesor, quien también estará presente para sostenerlo e impulsarlo.

De esta manera se va formando en el estudiante una mayor responsabilidad ante el estudio, la voluntariedad, la profundidad y la flexibilidad de pensamiento, la capacidad de problematizar y cuestionar. Emerge la creatividad, una vez que puede aplicar las esencias generales a los problemas particulares y singulares.

La propuesta, contrahegemónica por naturaleza, impacta sobre una cultura tradicional del proceso educativo, instaurada desde sus historias de vida anteriores en la escuela, que ha sido establecida desde determinadas costumbres, políticas institucionales, concepciones, creencias y supuestos de lo que debe ser la dinámica de la enseñanza-aprendizaje, de cómo debe ser el estudiante, del modo de actuación del maestro en el aula y de cómo debe transcurrir este proceso.

En el caso que se trata, la metodología aplicada innova en el proceso de enseñanza-aprendizaje de la Física porque rompe con la enseñanza tradicional y propicia una forma de aprendizaje diferente, en la que el estudiante tiene que ser responsable y constructor de su conocimiento porque es quien desempeña un papel activo; por ello, es una metodología centrada en el desarrollo del ser humano.

Se crean situaciones de enseñanza-aprendizaje en las que, si el estudiante no asume con responsabilidad su proceso de autoapren-

dizaje en el tiempo requerido para poder aportar en las discusiones grupales, no puede aprender al paso de sus compañeros de aula y, al ver que sus iguales lo logran, esto se convierte en un estímulo que lo lleva a fuertes crisis consigo mismo y con sus compañeros que sí lo logran hacer.

Se desarrollan también las habilidades comunicativas de expresión oral, la necesidad de organizar y planificar su tiempo y la transformación de sus estilos de vida. Este proceso les eleva la autoestima una vez que reconocen sus límites, logran cumplir sus tareas de estudio por sí solos y se saben capaces de alcanzar sus metas.

Conclusiones

La presente propuesta para la innovación educativa del proceso de enseñanza-aprendizaje de la Física en los estudiantes de ingeniería de la Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría explica cómo sus resultados pueden tener un impacto social, fundamentado en la experiencia obtenida en los grupos incluidos en el cambio de la forma de enseñanza-aprendizaje de la tradicional a la activa, que transforma el proceso docente educativo, sus componentes y categorías didácticas.

Resulta de utilidad para los futuros ingenieros de la Universidad y del país porque esta metodología impacta social y axiológicamente en la formación de los estudiantes desarrollando su capacidad para aprender conocimientos nuevos, como resultado de haber alcanzado un pensamiento teórico que les permita develar las esencias y las relaciones esenciales del objeto que estudian y lograr aplicar estos conocimientos en la solución de problemas técnicos que demanda la sociedad.

La utilidad de esta innovación educativa consiste en propiciar la configuración de la personalidad de los estudiantes, con una concepción científica del mundo dialéctica y compleja, con la capacidad de enfrentar la realidad en que vive el hombre hoy, mayor independencia cognoscitiva, comprensión y alta autoestima, una vez que se sienten capaces de aprender por sí solos.

Desarrolla el espíritu investigativo, la problematización, la creatividad, la solidaridad, la fuerza de voluntad y el tesón, la confianza en la ciencia y en sus avances, el autocontrol y la autorregulación, y los prepara para asumir los retos de su profesión.

Bibliografía

- ARMENTEROS, M. y C. VEGA (1999): *La innovación tecnológica: condicionamiento e impacto social en Tecnología y Sociedad GEST-MES*, La Habana: Editorial Félix Varela.
- CAÑAL DE LEÓN, P. et al. (2002): *La innovación educativa*, Madrid: Akal.
- CASTRO, F. (1991): *Salvar toda la justicia conquistada*, La Habana: Editora Política.
- GARCÍA, R. (2013): «Propuesta para el cambio en la situación de enseñanza-aprendizaje de la Física en la óptica ondulatoria», tesis de maestría en Psicología Educativa, Facultad de Psicología, Universidad de La Habana.
- NÚÑEZ, J. (2000): *La ciencia y la tecnología como procesos sociales*, La Habana: Editorial Félix Varela.
- PASCUAL, R. (coord.) (1998): *La gestión educativa ante la innovación y el cambio*, Madrid: Narcea.
- TALÍZINA, N. (1988): *Psicología de la enseñanza*, Moscú: Editorial Progreso.



Desarrollo de la asignatura «Energía solar, actualización y uso final», desde la perspectiva de la Física y su contribución a la formación de los ingenieros

GIRALDO JIMÉNEZ CHAPPOTIN,* ARCELIO HERNÁNDEZ
FEREIRA**

Introducción

La enseñanza de la Física en las universidades constituye un elemento esencial en la formación básica de todo ingeniero. Lo anterior se ve reflejado en el estudio realizado en los currículos de varios programas de ingeniería de algunas universidades nacionales e internacionales (ACOFI, 2013).

Sin embargo, producto de la actualización y aplicación de los fenómenos físicos en los problemas de ingeniería, es necesario introducir aspectos relacionados con la aplicación de la Física al uso de las fuentes renovables de energía y específicamente al estudio del uso de la energía solar. Esto lo motiva la presencia creciente de la energía solar en la actualidad por su gran aplicabilidad y limpieza como fuente primaria de energía (Peña, 2010).

En este sentido, resulta importante comprender que la energía es el motor del crecimiento, esencial para el desarrollo económico y social, y que en gran medida determina un adecuado nivel de calidad de vida. Sin embargo, con los crecimientos que se proyectan para el consumo mundial de energía, se estima que las emisiones de dióxido de carbono aumentarán en 3 500 millones de toneladas y podrán exceder en 61 % los niveles que se tenían en 1990 («Energía: proyecciones mundiales. Recursos, consumo, y emisión de CO₂», s. f.).

* Departamento de Ciencias Básicas, Facultad de Ingeniería y Administración, Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira.

** Departamento de Física, Facultad de Ingeniería, Universidad de Cienfuegos, Cuba.

Debido a esto, los ingenieros, en su quehacer diario de investigaciones y programas de desarrollo, tratan de buscar el recurso energético más viable desde el punto de vista económico y de cuidado medioambiental.

Es importante destacar que la participación de las energías renovables en el suministro de la demanda energética mundial ha crecido de manera considerable hasta alcanzar 10 % en 2012 (International Energy Agency, s. f.) y existe una tendencia al aumento.

La producción de energía eléctrica a través de centrales hidroeléctricas es la tecnología renovable más utilizada en el mundo, con aproximadamente el 15 % de la electricidad generada por esta vía.

El aprovechamiento del viento para la producción de energía eléctrica ha crecido de manera exponencial en los últimos años, sin embargo, aún no tiene una participación significativa en el suministro de la demanda energética mundial, pues cubre menos del 1,5 %.

La energía solar es el recurso energético más abundante, aproximadamente el 60 % de la energía proveniente del Sol llega a la superficie de la Tierra. Si se llegara a aprovechar el 0,1 % de esta energía con una eficiencia del 10 % sería al menos cuatro veces suficiente para cubrir la demanda energética mundial (Energías Renovables, s. f.).

En la actualidad la energía solar es una de las tecnologías más limpias de producción energética que se conocen, por lo que cada día es mayor el número de actividades en desarrollo en las que resulta aplicable. Para ello, los ingenieros desarrollan diseños novedosos que abarcan diferentes áreas, tales como autos solares, satélites, calentadores, piscinas solares, sistemas de bombeo solar, etc.

Ante este panorama, se observa la importancia de diseñar y aplicar un programa que, desde el punto de vista de la Física, provea al ingeniero las herramientas necesarias para el desarrollo de proyectos que incluyan el uso de fuentes renovables de energía dentro de su carrera profesional.

En este sentido se formuló la propuesta de una asignatura que se desarrollaría en una primera instancia con carácter electivo en los planes de estudio de ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira. Esta fue aprobada por los comités de carreras y se aplicó en el segundo semestre de 2018.

En el presente trabajo se recoge la experiencia y las conclusiones de la efectividad de incursionar en este tema como asignatura, con el propósito de que forme parte fundamental de los planes de estudios de las ingenierías en el futuro.

1. Inclusión de la asignatura «Energía solar, actualización y uso final»

En los planes de estudio de las carreras de ingenierías en las universidades de Colombia se observa que no están incluidas asignaturas que pudieran formar al ingeniero con una visión global del uso de las fuentes de energía renovables, y, en particular, el uso de la energía solar.

Se destaca la existencia de la carrera de Ingeniería en Energía en algunas universidades del país, una de las pocas que, además de brindar a sus estudiantes capacidades para analizar el contexto geopolítico y económico, los hace conscientes del papel que desempeña la energía en el desarrollo de una región y un país, así como de los impactos y beneficios ambientales y sociales.

Existen otras carreras universitarias que desempeñan un papel fundamental en este campo, como es el caso de Ingeniería en Energías Renovables en algunas universidades de España (Universidad EAN, s. f.).

Con el incremento de la población mundial, algunos sistemas de generación de energía como las termoeléctricas y las hidroeléctricas han comenzado a afectarse, por eso es necesario que el estudio de las energías renovables y particularmente de la energía solar se ponga de manifiesto en todas las carreras de ingeniería.

La Universidad Nacional de Colombia (UNAL) tiene como visión:

constituirse en una de las más importantes de América Latina y el Caribe, con programas de altísima calidad, influyendo en el Sistema de Educación Pública del país, con una gestión ágil y transparente que preste servicios en línea con soporte electrónico, con un énfasis especial en el desarrollo de la investigación desde múltiples formas organizativa y establecer los líderes que la nación necesita para su desarrollo y proyección al mundo globalizado y con grandes problemas ambientales específicamente en el país. (Universidad Nacional de Colombia, s. f.).

En el contexto antes planteado y teniendo en cuenta la visión de la UNAL, se propone la introducción de la asignatura «Energía solar, actualización y uso final» en la Facultad de Ingeniería y Administración de la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira, inicialmente como electiva, pero con miras a que más adelante pueda formar parte de la componente de profundización en el plan de estudios.

Se constituye en la modalidad teórica, no validable, con código 500205 y tres créditos para la carrera, presencial de cuatro horas

semanales y cinco horas de trabajo independiente, con un cupo máximo de 25 estudiantes por grupo.

En la propuesta, cada uno de los temas se imparte con un enfoque desde la Física, por lo que el estudiante debe tener conocimientos previos relacionados con la mecánica, el electromagnetismo, el movimiento ondulatorio y la óptica, todos abordados en los cursos de Física.

El propósito fundamental es buscar la concientización de los estudiantes sobre la crisis energética y las consecuencias que tiene para el medioambiente la utilización de energías de origen fósil; así como la adquisición de fundamentos teóricos, desde la física, de radiación solar, la influencia que puede tener la atmósfera durante la interacción con ella, su medición y la utilización de los datos disponibles para usos ingenieriles. En particular, se hace énfasis en la comprensión y profundización de los conceptos relacionados con la radiación solar y su comparación con la emisión del cuerpo negro, los conceptos que caracterizan la conversión de energía solar en eléctrica y el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos básicos, la comprensión del funcionamiento de sistemas solares activos y pasivos para la conversión de la energía solar en energía térmica, los distintos elementos de captación, almacenamiento y control, y el estudio de los principios básicos de las aplicaciones más comunes, como son invernaderos, secadores, destiladores y pozas solares.

Los estudiantes, al terminar el curso, estarán en la capacidad de aplicar los conocimientos teóricos en problemas reales, teniendo en cuenta variables económicas asociadas a la aplicación de las energías renovables.

1.1. Contenidos

En la tabla 1 se relacionan los temas y contenidos correspondientes propuestos para el desarrollo de la asignatura.

Tabla 1. Temas y contenidos desarrollados en la asignatura «Energía solar, actualización y uso final»

TEMAS	CONTENIDOS GENERALES
1. Introducción a las energías renovables	Combustibles fósiles, fuentes de energía renovables, ventajas de la energía renovable sobre los combustibles fósiles. Tendencias. (Interconsulting Bureau, 2015).
2. Introducción a la energía solar	La crisis ambiental y el problema energético, el panorama energético global y nacional, las energías renovables y la energía solar. (Guillén, 2012; Castell y Bordas, 2011).

TEMAS	CONTENIDOS GENERALES
3. Radiación solar	El Sol, la constante solar, radiación extraterrestre y su variación, rayo solar sobre superficies horizontales e inclinadas, ángulos, instrumentos de medición: piranómetros y pirheliómetros. Atenuación atmosférica, estimación de la radiación solar media, estimación de la radiación solar. Valores medios horarios, diarios y mensuales; componentes directa, difusa y reflejada. Modelos de radiación solar. Radiación solar sobre superficies inclinadas, utilidad de la radiación solar. (Duffie y Beckman, 1991).
4. Elementos básicos de electricidad. Electricidad solar	Corriente eléctrica. Fuentes de energía (inducción electromagnética, paneles solares fotovoltaicos FV, baterías, potencial eléctrico, tensión eléctrica. Intensidad de corriente eléctrica. Resistencia eléctrica, conexiones. Tipos de corriente (CA y CC). Potencia eléctrica, Potencia nominal de los paneles fotovoltaicos. Ley de Ohm en circuitos sencillos. Conservación de la energía y eficiencia energética. Efecto fotoeléctrico externo e interno. Electricidad solar.
5. Sistemas fotovoltaicos	Conversión directa mediante celdas solares. Principios básicos. Comportamiento de las celdas solares. El sistema fotovoltaico: generador, acumulador, regulador y carga; característica y tipo de paneles fotovoltaicos. Interconexión de paneles. Aplicaciones: sistemas fotovoltaicos autónomos, sistemas híbridos y sistemas conectados a red (módulos o arreglos FV). Dimensionado de sistemas fotovoltaicos. Cálculo de los elementos de la instalación. Estudio de viabilidad. Presentación de proyecto. Ejecución y mantenimiento de las instalaciones fotovoltaicas. (Sánchez, 2008; CIEMAT, 2007; Montgomery, 1994).
6. Conversión térmica de la energía solar. El colector solar plano, su análisis energético	Descripción del colector solar de placa plana. Ecuaciones básicas de balance energético del colector solar de placa plana. Coeficiente global de pérdidas de calor del colector. Factores de eficiencia, de remoción de calor y de flujo del colector. Producto transmitancia-absorbancia efectivo. Efectos de ensuciamiento y sombreado. Efectos de capacidad térmica del colector. Colectores de aire. Medición de las performances de los colectores. Test de eficiencia. Modificador del ángulo de incidencia. Correcciones y consideraciones prácticas. Colectores solares con concentradores. Otros tipos de colectores. (Sánchez, 2008; Vicente, 2009).
7. Algunas aplicaciones térmicas de la energía solar	Invernaderos. Secaderos de productos agrícolas y de madera. Destilación de agua. Pozas solares. Sistemas solares térmicos de potencia. Esterilizador solar. (Meinel y Meinel, 1982; CENSOLAR, 2009).

1.2. Metodología de desarrollo de la asignatura

La metodología incluye el desarrollo de clases magistrales, en las que se exponen los fundamentos de cada uno de los contenidos enfatizando en el conocimiento de la física para explicar el fenómeno de la radiación solar, así como los efectos que permite obtener la energía eléctrica en los materiales semiconductores y la energía térmica sobre los metales y otros materiales de altos efectos térmicos. En lo posible, se considera la

participación de profesores invitados o ingenieros expertos. La participación de los estudiantes con exposiciones y trabajos escritos permitirá la discusión abierta de los temas planteados. Se planificaron trabajos de campo, como visitas a empresas, granjas o instituciones que estén aplicando o desarrollando tecnología solar. También los estudiantes tienen la oportunidad de operar equipos de medición de la radiación solar, con el objetivo de comprender e interpretar los datos.

Los contenidos se imparten en cuatro módulos durante la duración del semestre, como se representa en la tabla 2 del cronograma de trabajo.

Tabla 2. Cronograma de trabajo

MÓDULOS	TEMAS /SEMANAS
I	1 y 2/5
II	3 y 4/5
III	5 y 6/4
IV	7/2

1.3. Recursos

Para el desarrollo exitoso del curso se cuenta con recursos audiovisuales, acceso a equipos especializados en colaboración con empresas de la región, visita de expertos y trabajos de campo. Se debe desatacar que en esta primera versión de la asignatura no se dispone de un laboratorio básico, por lo que tiene carácter teórico; este es un aspecto a mejorar, como se muestra en la validación a través del desarrollo de la encuesta realizada.

1.4. Evaluación

El proceso de evaluación se desarrolla con la participación activa del estudiante, de acuerdo con la metodología propuesta, con el objetivo de que exista una profundización en el conocimiento de las nuevas tendencias de aplicación y uso de la energía solar.

En la tabla 3 se pone de manifiesto la ponderación de las actividades vinculadas a la metodología de la evaluación.

Tabla 3. Ponderación de la evaluación

FORMA DE EVALUACIÓN	PONDERACIÓN (%)
Exposiciones de temas	30
Visitas de campo e informes	10
Tareas y trabajos escritos	20
Proyecto final del curso	40

1.5. Análisis y validación de la inclusión de la asignatura en las carreras de ingeniería

Para desarrollar el análisis y la validación de la efectividad de introducir la asignatura en el plan de estudio de las ingenierías, se aplicó una encuesta evaluativa a la comunidad de estudiantes que pertenecen a la Facultad de Ingeniería y Administración. Esta se considera una técnica de investigación estandarizada para generar una información cuantificable que puede ser analizada mediante técnicas estadísticas con fines descriptivos o poner a prueba un prototipo o hipótesis (Marradi, Archenti y Piavoni, 2007). Para su aplicación se tiene en cuenta el diseño del muestreo, el cuestionario, el plan de tabulación, y su implementación se realiza mediante una herramienta gratuita de Google.

La encuesta se realizó con una valoración cuantitativa mediante un rango de puntajes entre cero y cinco puntos, y desde una perspectiva cualitativa con preguntas abiertas, por lo que tiene carácter mixto.

En la tabla 4 se muestra el cuerpo de la encuesta que se aplica según los criterios y los contenidos de las preguntas para cada uno de estos.

Tabla 4. Encuesta realizada según criterios que cuantifican la efectividad del desarrollo de la asignatura

CRITERIOS	CONTENIDOS DE LAS PREGUNTAS
1. Objetivos de la asignatura	¿Los objetivos están documentados y difundidos suficientemente? ¿Los objetivos están formulados de forma precisa y clara?
2. Planificación de la enseñanza	¿Existe una planificación del desarrollo de la asignatura en cuanto a estructura temporal, recursos humanos y materiales necesarios? ¿La planificación permite cumplir los objetivos previstos? ¿El programa de la asignatura está disponible? ¿El programa de la asignatura es coherente con la formación del ingeniero en su área de desempeño?
3. Desarrollo de la enseñanza	¿Se cumplen las actividades planificadas? ¿El ritmo de las clases permite tratar todos los temas adecuadamente? ¿Los materiales recomendados y utilizados resultan útiles para la preparación de la asignatura? Si incorpora prácticas: ¿los aspectos prácticos se cubren a lo largo del curso? ¿su presentación y organización son adecuadas? ¿existe conexión entre los contenidos prácticos y los teóricos? ¿No hay discrepancias lejanas con las otras materias del programa de su carrera? ¿La dedicación temporal a la asignatura (horas no presenciales) es aproximadamente la esperada?

Tabla 4. Encuesta realizada según criterios que cuantifican la efectividad del desarrollo de la asignatura (cont.)

CRITERIOS	CONTENIDOS DE LAS PREGUNTAS
4. Valoración de contenidos	<p>¿Los objetivos de la asignatura son claros?</p> <p>¿Tiene dificultades de comprensión al carecer de conocimientos previos relacionados con los temas de Física?</p> <p>¿Se cumplen los objetivos propuestos en el programa?</p> <p>¿La asignatura cubre sus expectativas?</p> <p>¿Su interés por el tema ha aumentado como resultado de este curso?</p> <p>¿Ha encontrado el curso intelectualmente estimulante?</p> <p>¿Este curso lo ha motivado a ampliar conocimientos fuera de clase?</p> <p>¿Considera que la información aportada es amplia?</p> <p>¿La información está actualizada?</p> <p>¿Los temas de la asignatura están bien relacionados?</p> <p>¿Los contenidos van a resultar útiles para su formación personal y profesional?</p> <p>¿Es importante la introducción de la asignatura en su plan de estudio de ingeniería?</p> <p>¿Considera positivo el aporte del conocimiento sobre el uso de la energía solar en su carrera y su formación?</p> <p>¿Según su criterio, el conocimiento de la teoría de la radiación solar desde la física influye en su formación como ingeniero?</p> <p>¿La asignatura le aporta nuevos conocimientos?</p> <p>¿El temario es accesible al nivel de los estudiantes?</p> <p>¿El contenido de la asignatura es actual?</p> <p>¿Está satisfecho de haber cursado esta asignatura?</p>
5. Evaluación del aprendizaje	<p>¿La metodología de evaluación se realiza conforme a los criterios, normativas y procedimientos establecidos en el programa de la asignatura?</p> <p>¿Los criterios de evaluación del rendimiento se han explicado con claridad?</p> <p>¿El procedimiento de evaluación le parece adecuado?</p>
6. Personal académico	<p>¿Hay personal académico suficiente y calificado para cumplir la planificación de la enseñanza?</p> <p>¿La metodología en la presentación y organización de los contenidos es adecuada?</p> <p>¿Los profesores preparan bien las clases y dominan la materia?</p> <p>¿Los profesores le permiten y/o animan a que participe en las clases?</p> <p>¿Las cuestiones planteadas son resueltas puntualmente?</p> <p>¿El trato personal y el clima de relación profesor-alumno son correctos?</p>
7. Recursos y servicios	<p>¿Las instalaciones y el equipamiento son suficientes para el desarrollo de la enseñanza?</p> <p>¿Se garantiza el acceso a distintas fuentes de información, bases de datos y fondos bibliográficos para cubrir las necesidades del desarrollo de la enseñanza?</p> <p>¿Existe la tecnología necesaria para la obtención, tratamiento, almacenamiento, transferencia y presentación de datos e información?</p>
8. Valoración global	<p>¿La asignatura ha cubierto sus expectativas?</p> <p>¿Está satisfecho con la calidad del profesorado?</p> <p>¿Está satisfecho con el interés de la asignatura?</p> <p>¿Considera que la asignatura le será de utilidad?</p> <p>¿Recomendaría la asignatura a otros compañeros?</p> <p>¿Por qué se matriculó en este curso?</p> <p>Señale hasta tres aspectos positivos y tres negativos de la asignatura.</p>

1.6. Gráficas y resultados

En las figuras se muestran los histogramas de los resultados de la encuesta en el grupo de 25 estudiantes, que proporcionan una puntuación en un intervalo de puntos entre cero y cinco. Por el eje vertical se muestra la escala correspondiente a este intervalo de valores (puntos). Por el eje horizontal se observa el resultado de las respuestas a cada pregunta, según el criterio establecido. Los estudiantes que participaron en la encuesta son representados con la letra E y el número que corresponde a cada uno; los colores diferentes de las barras del histograma representan las preguntas que corresponden a cada criterio.

En cada una de las gráficas se puede evidenciar el nivel de aceptación en muchos de los aspectos correspondiente a los criterios con miras a justificar la inclusión de la asignatura en las carreras de ingeniería, ya no como asignatura electiva.

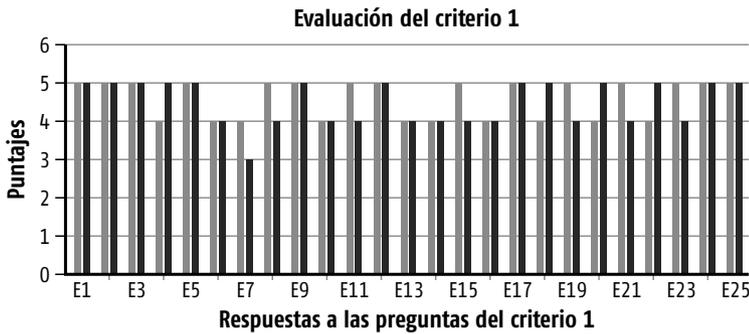


Figura 1. Resumen de la evaluación que dan los encuestados al criterio 1.

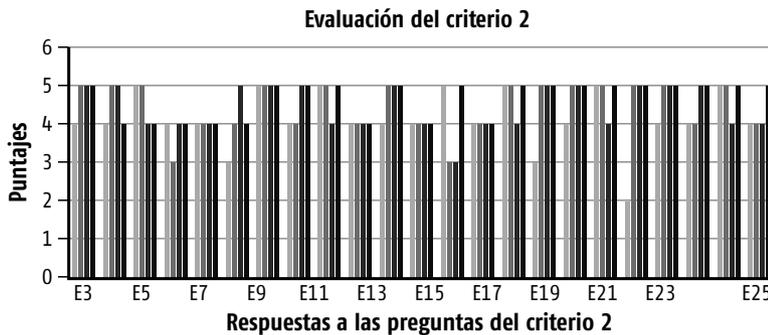


Figura 2. Resumen de la evaluación que dan los encuestados al criterio 2.

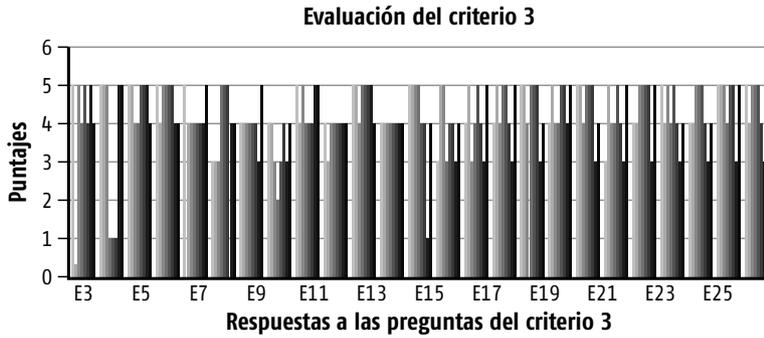


Figura 3. Resumen de la evaluación que dan los encuestados al criterio 3.

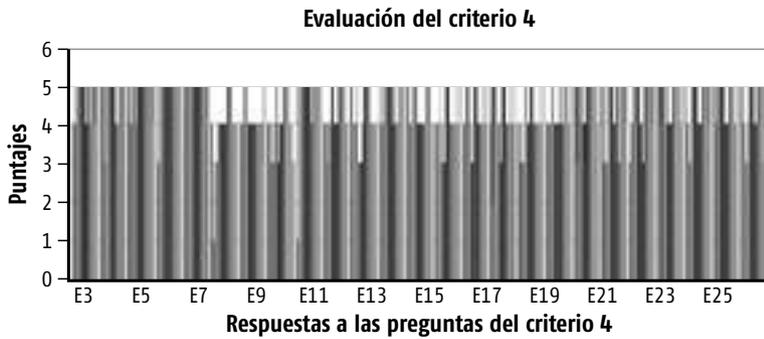


Figura 4. Resumen de la evaluación que dan los encuestados al criterio 4.

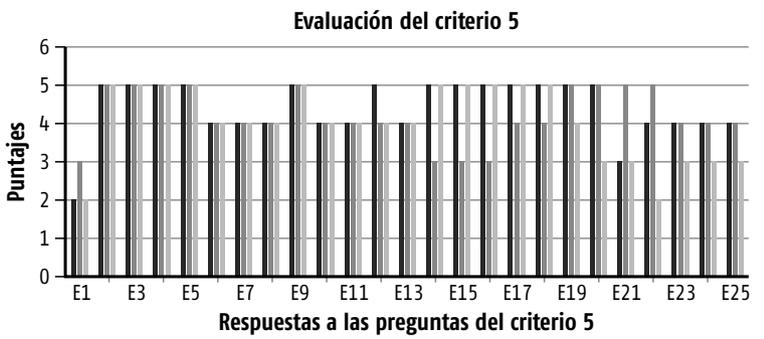


Figura 5. Resumen de la evaluación que dan los encuestados al criterio 5.

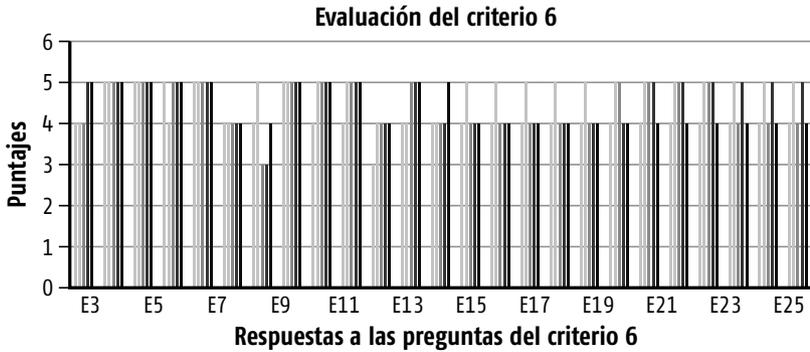


Figura 6. Resumen de la evaluación que dan los encuestados al criterio 6.

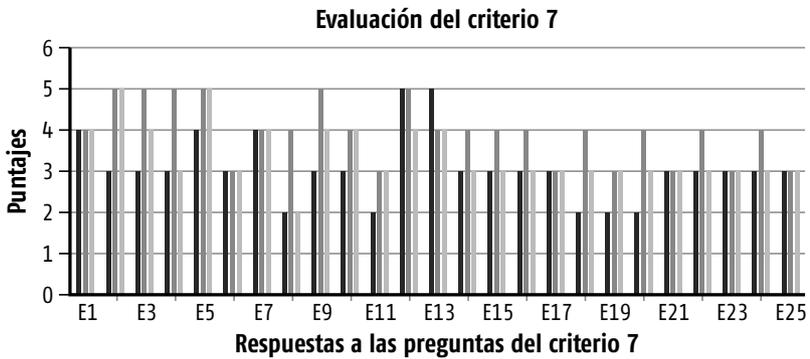


Figura 7. Resumen de la evaluación que dan los encuestados al criterio 7.

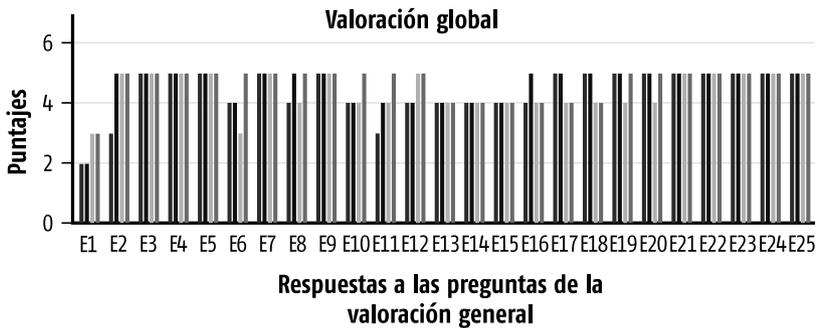


Figura 8. Resumen de la evaluación que dan los encuestados al criterio 8.

¿Por qué te matriculaste en este curso?

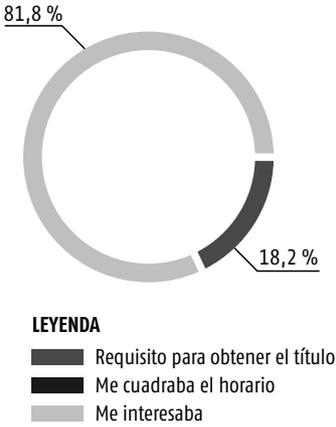


Figura 9. Resultado a la pregunta con tres posibles respuestas.

En la tabla 5 se pone de manifiesto la relación de los aspectos positivos y negativos que consideraron los encuestados sobre el desarrollo de la asignatura.

Tabla 5. Relación de aspectos positivos y negativos en la valoración cualitativa de la asignatura

ASPECTOS POSITIVOS	ASPECTOS NEGATIVOS
La aplicación, la novedad, la actualidad.	Falta de prácticas, visitas y laboratorios.
Está bien redactada, la importancia en el énfasis ambiental, el uso de nuevas tecnologías.	La falta de realización de prácticas, la carencia de no tener un laboratorio propio para la asignatura.
Innovador, gran pedagogía, funcionamiento.	Falta de un laboratorio, materiales.
Buen horario, buen profesor y buena participación en clase.	Falta de recursos, falta de materiales, falta de salidas.
Muestra las aplicaciones directas del efecto fotoeléctrico. El proyecto de diseño atiende a las necesidades de cada estudiante.	Las cuatro horas en un solo día, no existen paneles solares físicos de la universidad, faltan más salidas.
Manejo del tema por parte del docente.	Horario pesado, la tarde no es una buena hora para una asignatura que demanda tanto tiempo.
El contenido, aplicación al medioambiente y sus diferentes usos.	Falta de elementos para dimensionar el tema de la asignatura (equipos de medición de radiación/celdas fotovoltaicas).

Según los resultados planteados, se observa un buen nivel de aceptación de la asignatura por parte del estudiantado y, en general, de la comunidad

de la Facultad de Ingeniería y Administración de Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira. Esto se evidencia con un promedio de 4,5 puntos para el criterio 1; 4,1 puntos para el 2; 4,4 puntos para el 3; 4,5 puntos para el 4; 4,4 puntos para el 5; 4,4 puntos para el 6; 3,6 puntos para el 7; y 4,4 puntos para el 8; y se obtuvo un promedio general de evaluación para la asignatura de 4,3 puntos.

También es de destacar que el 81,8 % de los estudiantes cursó la asignatura por interés sobre el tema, lo que fortalece la teoría de la necesidad de introducir los temas de energías renovables y específicamente aquellos sobre la energía solar en el plan de estudio de las ingenierías, teniendo en cuenta las tendencias actuales hacia las fuentes renovables de energía.

Conclusiones

El interés por la aplicabilidad de las energías renovables y en especial la solar es cada vez más creciente en el desarrollo de la humanidad.

Con el trabajo se evidencia la aplicabilidad e importancia de incluir en la formación de los ingenieros los temas relacionados con el uso de la energía solar como fuente de energía renovable, con un gran nivel de aceptación a través de la creación de la asignatura «Energía solar, actualización y uso final».

Se demuestra de manera cuantitativa y cualitativa, mediante la encuesta diseñada para tal fin, que en general no hay discrepancia e interferencias con las otras asignaturas que se imparten en las carreras de ingenierías, y que el conocimiento de la teoría de la radiación solar desde la física influye en la formación del ingeniero de manera positiva.

Además, se destaca que la información está actualizada y los temas de la asignatura están bien relacionados.

Se considera, por el resultado de la encuesta y el promedio de puntos obtenidos en la evaluación, la importancia de introducir la asignatura en el plan de estudio de ingeniería para el fortalecimiento de la formación del ingeniero.

Asimismo, se da a conocer que la asignatura aporta nuevos conocimientos gracias a un temario accesible al nivel de los estudiantes y con contenido actualizado.

Por último, se debe destacar que los resultados evidencian una debilidad: el hecho de que se ofrece en esta primera versión solo con el componente teórico, pues, aunque están contempladas en la metodología las visitas prácticas, se necesita elaborar un proyecto

de prácticas de laboratorios que fortalezcan el buen desempeño del curso.

Agradecimientos

Agradecemos la colaboración brindada por parte del comité de carreras de ingenierías de la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira, por la comprensión, el análisis, la evaluación y aprobación de la propuesta para que forme parte del plan de estudio de las ingenierías como materia electiva. Agradecimientos también a los participantes de la encuesta que llevó a la consolidación del trabajo.

Bibliografía

- ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE FACULTADES DE INGENIERÍA (ACOFI) (2013): «La Física en Ingeniería», <<http://www.acofi.edu.co/wp-content/uploads/2013/08/Marco-Conceptual-de-F%C3%ADsica.pdf>> [10/1/2019].
- CASTELL, XAVIER E. y S. BORDAS ALSINA (2011): *Energía, agua, medioambiente, territorialidad y sostenibilidad*, Madrid: Ediciones Díaz de Santos.
- CENTRO DE ESTUDIOS ENERGÍA SOLAR (CENSOLAR) (2009): *Energía solar. Aplicaciones prácticas*, Sevilla: CENSOLAR.
- CENTRO DE INVESTIGACIONES ENERGÉTICAS, MEDIOAMBIENTALES y TECNOLÓGICAS (CIEMAT) (2007): *Fundamento, dimensionado y aplicaciones de la energía solar fotovoltaica*, Madrid: CIEMAT.
- DUFFIE, J. A. y W. A. BECKMAN (1991): *Solar Engineering*, New York: Wiley & Son.
- «Energía: Proyecciones mundiales. Recursos, consumo, y emisión de CO₂» (s. f.). <<http://www.ub.edu/prometheus21/articulos/energia.pdf>> [11/1/2019].
- ENERGÍAS RENOVABLES (s. f.), <<https://www.energias-renovables.com/fotovoltaica>> [11/1/2019].
- GUILLÉN SOLÍS, O. (2012): *Energías renovables, una perspectiva ingenieril*, México D. F.: Trillas.
- INTERCONSULTING BUREAU (2015): *Aprovechamiento de energías renovables*, Bogotá: Ediciones de la U y Málaga: ICB Editores.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA) (s. f.). <<https://www.iea.org/statistics/kwes/>> [11/1/2019].
- MARRADI, A.; N. ARCHENTI y J. I. PIAVONI (2007): *El diseño de la investigación en metodología de las ciencias sociales*, Buenos Aires: Emecé Editores.

- MEINEL, A. y M. MEINEL (1982): *Aplicaciones de la energía solar térmica*, Barcelona: Reverté.
- MONTGOMERY, R. N. (1994): *Energía solar, selección del equipo, instalación y aprovechamiento*, Madrid: Limusa.
- PEÑA, R. (2010): *Introducción a las energías renovables*, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- SÁNCHEZ, M. (2008a): *Energía solar fotovoltaica*, Madrid: Limusa.
- SÁNCHEZ, M. (2008b): *Energía solar térmica*, Madrid: Limusa.
- UNIVERSIDAD EAN (s. f.): «Carrera de Ingeniería en Energías», <<https://universidadean.edu.co/programas/carreras-profesionales/carrera-en-ingenieria-en-energias>> [20/1/2019]
- UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA (s. f.): «Misión y visión», <<http://unal.edu.co/la-universidad/mision-y-vision.html>> [20/1/2019].
- VICENTE, A. (2009): *Energía solar térmica y de concentración. Manual práctico de diseño, instalación y mantenimiento*, Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.



III. La enseñanza experimental



Determinación de la constante de Planck mediante el uso de LED controlados por Arduino

CARLOS ERNESTO CAVO MOLA,* ERNESTO GARCÍA ALFONSO,*
SAMANTHA LÓPEZ PÉREZ,* JOELUIS CERUTTI TORRES*

Introducción

Existen dos mecanismos básicos para generar luz visible: incandescencia y luminiscencia. La incandescencia genera una amplia banda de radiación emitida por la materia (en general, los sólidos) como consecuencia del movimiento térmico de los átomos que la constituyen. Por otro lado, la luminiscencia se compone de bandas angostas de radiación emitida por la materia como resultado de un cambio en los estados de energía (por lo general, de los electrones en los átomos) cuando la muestra es excitada por una fuente externa de energía que no varía significativamente su temperatura. Esto último es lo que sucede en los semiconductores, en particular es el caso del diodo emisor de luz (LED—Light Emission Diode) (Zheludev, 2007).

1. Fundamento teórico

1.1. Teoría de bandas

Las ideas clásicas, aplicadas a la física del estado sólido, alcanzaban a explicar el comportamiento de la capacidad calorífica para cierto rango de temperaturas, así como la conducción en metales. Sin embargo, diversidad de fenómenos asociados al comportamiento de los sólidos quedaban sin explicación; entre ellos, la existencia y el comportamiento de los semiconductores. La aplicación de los principios de la mecánica cuántica deriva en la teoría de bandas, que explica de manera satisfactoria la conducción en los sólidos (Eisberg y Resnick, 1984).

* Facultad de Física, Universidad de La Habana, Cuba.

Los sólidos cristalinos son un arreglo periódico y ordenado de átomos, que constituyen un potencial periódico para el movimiento de un electrón. Al aplicar la ecuación de Schrödinger a este tipo de sistemas, se obtiene una solución que divide las energías permitidas en bandas (figura 1).

En los semiconductores y aislantes, los electrones se encuentran en la llamada «banda de valencia» y la próxima región energética que los electrones pudiesen ocupar (banda de conducción) está separada por una región prohibida o *gap*. En los semiconductores, en general, el ancho del *gap* es función de la temperatura.

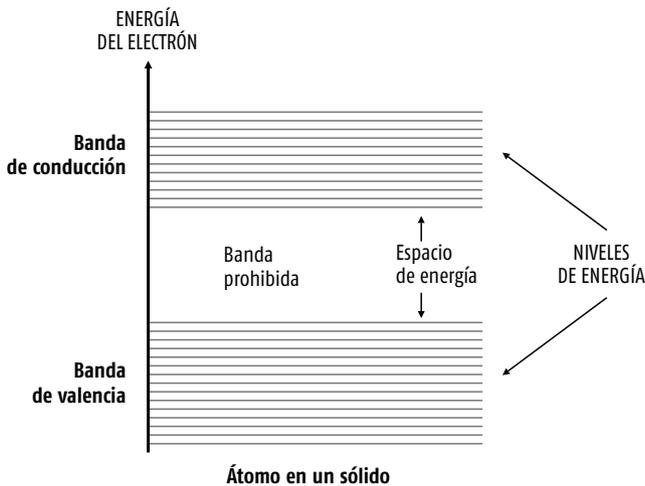


Figura 1. Representación esquemática de las bandas de energía en un sólido.

1.2. Dopaje

Para mejorar la eficiencia de los materiales semiconductores, se les suele dopar con *impurezas*. Una impureza es un átomo que no pertenece al arreglo periódico, ya sea porque es de una sustancia diferente o porque simplemente no hay átomo. Se llama «impureza donora» cuando se sustituye un átomo de la red por otro que posee más electrones de valencia que el átomo al que sustituye, por lo que puede donar este exceso de electrones a la banda de conducción con mayor facilidad (es como si este electrón «de más» estuviese «dentro» del *gap*, muy cerca de la banda de conducción). Una impureza aceptora es una que posee menos electrones que el átomo al que sustituye (de modo que el «hueco» también se ubica «dentro del *gap*», ligeramente

por encima de la banda de valencia), de manera que puede aceptar electrones que están en la banda de valencia, dándoles la posibilidad de «saltar» con más facilidad a la banda de conducción.

Si el sistema posee ambos tipos de impurezas, el material puede disminuir su energía cuando un electrón libre cae en un nivel del aceptor ocupado por un hueco. La recombinación de un electrón y un hueco en un semiconductor puede ir acompañada de la emisión de un fotón; la energía perdida por el electrón es absorbida por el fotón. Este es el tipo de luminiscencia que tiene lugar en un semiconductor emisor de luz. Se puede mejorar la eficiencia del semiconductor de diversas formas: inyectando electrones en un material en el cual predominan los huecos (tipo p) o inyectando huecos en un material en el que predominan los electrones (tipo n) (figura 2).

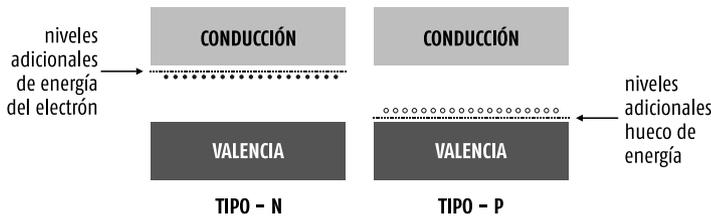


Figura 2. Representación esquemática de los semiconductores tipo p y tipo n.

1.3. Juntura p-n

La forma más efectiva para inyectar cargas en un semiconductor es la *juntura p-n* (Shockley, 1949). Como su nombre indica, de un lado de la unión (lado n) predominan las impurezas donoras, y por tanto los electrones, y del otro (p) predominan los huecos (figura 3). Al aplicar la juntura, el sistema trata de establecer un equilibrio en ambas partes de la unión; los electrones viajan de la zona n a la zona p por difusión. Sin embargo, esto crea un desbalance de cargas, los electrones se concentran en la región p, y los huecos en la n, creando un campo eléctrico. Así, se forma una *región de carga espacial*. Para que el semiconductor conduzca la electricidad (o ilumine, en el caso de los LED) se debe polarizar en directa (conectar el positivo a la zona p, y el negativo a la zona n) y aplicar un voltaje mayor que el voltaje interno de la juntura. En ese caso, el voltaje externo logra que sigan pasando electrones desde la zona n,

a través de la zona de carga espacial, hacia la zona p, conduciendo la corriente.

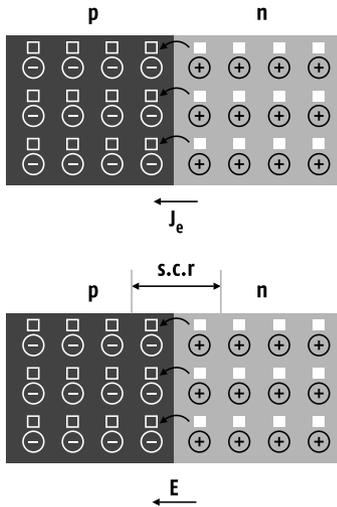


Figura 3. Representación esquemática de la juntura p-n.

Si en la región de carga espacial un electrón se recombina con un hueco, entonces se desprende energía. Esta pérdida de energía puede ser radiativa, en cuyo caso se emite un fotón, o no radiativa, en cuyo caso se emiten fonones. El valor de la energía radiada, y por tanto la frecuencia de la radiación emitida, dependen del *gap*, es decir, del material.

1.4. Ecuaciones de trabajo

Método I

Para el análisis numérico del fenómeno de la producción de luz en los LED, puede utilizarse un modelo similar al empleado por Einstein para el efecto fotoeléctrico (EFE) («The Nobel Prize in Physics 1921. Award Ceremony Speech», 1922; Aarons y Peppard, 1965). Aunque se trata de dos fenómenos diferentes, el razonamiento propuesto por Einstein, basado en la ley de conservación de la energía, sí puede ser utilizado debido a la universalidad de dicha ley. Por lo tanto, la ecuación que expresa dicha conservación quedaría:

$$K = E - W_0 \quad (1)$$

En nuestro caso, debemos hablar de K_{\min} , que puede interpretarse como la energía cinética mínima que debe poseer un electrón que penetra la zona de carga espacial, y estará dada por:

$$K_{\min} = eV_0 \tag{2}$$

donde V_0 es el voltaje de codo, es decir, el voltaje a partir del cual comienza a pasar corriente por el diodo. Este puede obtenerse por simple inspección de una curva voltampérica, aunque existen métodos más refinados, como puede ser ajustar la zona lineal de la curva a una recta y tomar la intersección de esta recta con el eje de las abscisas como voltaje de codo.

El W_0 puede interpretarse como las pérdidas de energía debido a la variedad de procesos no radiativos que pueden ocurrir dentro de la zona de carga espacial. En este trabajo asumimos que estas pérdidas son iguales para todos los LED.

Sustituyendo $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ y K_{\min} en (2), obtenemos como ecuación de trabajo:

$$V_0 = \frac{hc}{e\lambda} - \frac{W_0}{e} \tag{3}$$

donde, a partir del conocimiento del voltaje de codo y la longitud de onda de varios LED, puede determinarse la constante de Planck.

Método II

Existen modelos que relacionan la corriente que circula por el LED y el voltaje aplicado, involucrando la energía del *gap*. Una de estas relaciones aproximadas es:

$$I(V) = Ae^{\frac{eV-E}{\eta k_B T}} \tag{4}$$

donde:

- A es una constante de proporcionalidad
- $e = 1,602176565(35) \times 10^{-19} C$ es la carga del electrón
- E es la energía del *gap*
- η es un factor que depende de cada LED
- $k_B = 1,3806488(13) \times 10^{-23} J.K^{-1}$ es la constante de Boltzmann

- T es la temperatura
- V e I son el voltaje y la corriente aplicados, respectivamente.

Si se toma logaritmo en ambos miembros de (4) se obtiene:

$$\ln I(V) = mV + b \quad (5)$$

donde:

- m es la pendiente de una recta y viene dada por $\frac{e}{\eta k_B T}$
- b es el intercepto de la recta y viene dado por $\ln A - \frac{E}{\eta k_B T}$.

Si la ecuación (5) se ajusta mediante una función lineal, del gráfico de $\ln I(V)$ vs. V , se puede obtener el valor de la pendiente m para cada LED. Debe tenerse en cuenta la región de trabajo del LED, de manera que sea válida la expresión (3) (región de crecimiento exponencial de la curva voltampérica).

A partir del conocimiento de la pendiente en la relación anterior, y sabiendo que la frecuencia de la radiación emitida está directamente relacionada con la energía del *gap* ($E = h\nu$), podemos escribir:

$$\frac{-be}{m} = h\nu - \eta k_B T \ln A \quad (6)$$

Si se grafican estos valores para cada LED, con sus longitudes de onda, se obtiene, nuevamente, una línea cuya pendiente es, en este caso, el valor de la constante de Planck.

Si las mediciones fueron hechas bajo las mismas condiciones externas (igual temperatura en este caso), las diferencias en los valores de la pendiente solo se deberán a diferencias en los valores de η .

2. Desarrollo experimental

Para el montaje del experimento se necesitan los siguientes elementos:

- LED de diferentes longitudes de onda (verde, rojo, amarillo y azul)

- Arduino Genuino UNO
- Resistencias de 220
- Potenciómetro
- Pantalla LCD 16x2
- Tabla *protoboard*
- Cables para las conexiones
- Control remoto
- Monocromador
- Fotodiodo de Silicio
- Amplificador Lock-in

2.1. Determinación experimental de la longitud de onda

La distribución de intensidad de emisión de los dispositivos LED es una curva gaussiana con un marcado pico en una longitud de onda bien determinada, la cual tomaremos como la frecuencia espacial de emisión.

Para obtener la longitud de onda de los diodos se montó un dispositivo experimental, como muestra la figura 4. Se conectó el LED a una fuente de voltaje continuo de 5V y a una resistencia en serie para controlar la corriente que circula por el LED y evitar quemarlo. Al estar dicho LED conectado a un potencial, comienza a circular corriente, emitiendo luz.

Frente al dispositivo en estudio se colocó un monocromador y a su salida se conectó un fotodiodo de silicio, el cual, a su vez, fue conectado al amplificador Lock-in, y este último a la computadora, a través de puerto serie RS232. Los voltajes del fotodiodo se obtuvieron en la computadora usando un programa diseñado en LabView.

El monocromador es un dispositivo usado para aislar un pequeño intervalo de longitudes de onda de un espectro. Consiste en una rendija de entrada, una red de difracción y dos espejos, y una ranura de salida donde se colocó, en este caso, el fotodiodo de silicio. Por otro lado, el monocromador posee un motor que hace girar la red de difracción de forma tal que se puede indicar el intervalo de longitud de onda que se desea barrer.

Luego, variando la longitud de onda con el motor del monocromador y tomando simultáneamente la señal de salida del Lock-in, se obtuvo el espectro, es decir, la curva de intensidad vs. longitud de onda para cada uno de los LED.

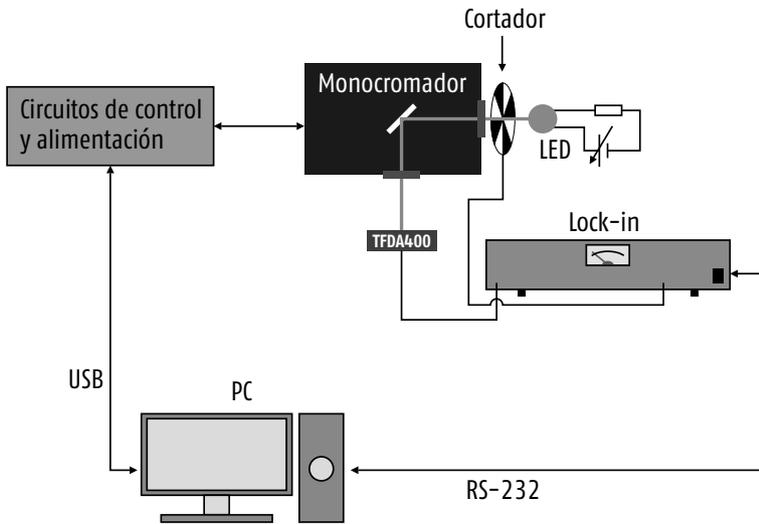


Figura 4. Montaje experimental para la determinación del espectro de los LED.

En la tabla 1 se muestran los resultados obtenidos para las longitudes de onda de cada LED.

Tabla 1. Valores de las longitudes de onda para cada LED

LED	LONGITUD DE ONDA (NM)
Amarillo	595
Verde	555
Rojo	633
Azul	430

2.2. Determinación experimental de la curva voltampérica de los LED

Una vez montado el circuito de la figura 5, se realizó un programa sobre Arduino para controlar el sistema de medición («The Nobel Prize in Physics 1921. Award Ceremony Speech», 1922). Por medio de un control remoto, se selecciona el LED a caracterizar. Utilizando un potenciómetro lineal se varía la diferencia de potencial suministrado a los terminales del LED polarizado en directa. Los valores de corriente y voltaje se muestran en la pantalla LCD. Este procedimiento se repite para cada LED aproximadamente veinte veces.

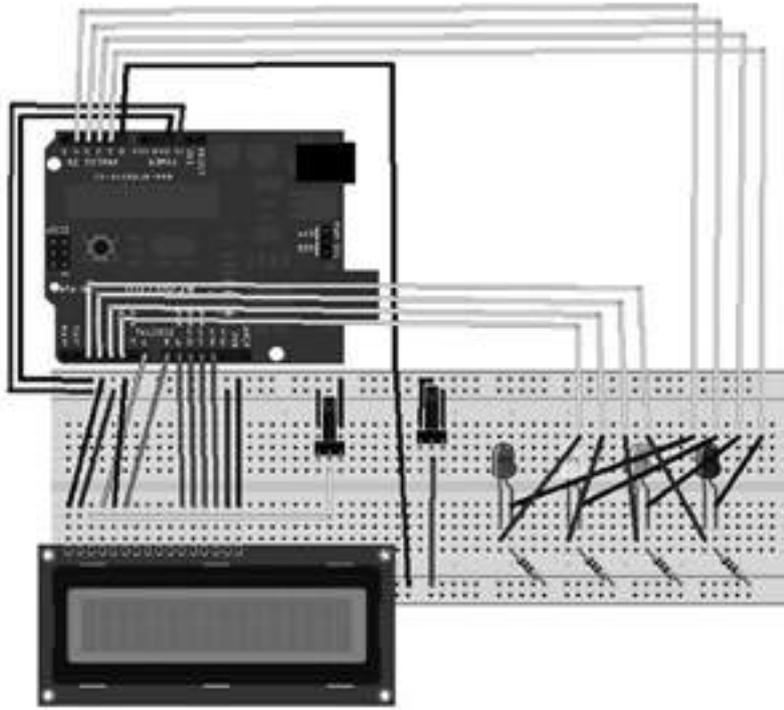


Figura 5. Circuito construido para caracterizar los LED.

2.3. Análisis de las incertidumbres

Para las mediciones de la práctica de laboratorio propuesta usamos el conversor analógico-digital (ADC) de un Arduino Genuino Uno (Margolis, 2012). Este conversor es del tipo de aproximaciones sucesivas, que suelen ser muy exactos, y en particular tiene una resolución de 10 bits. Si los LED y el conversor son alimentados con 5 Volts, la menor variación de voltaje que puede determinar el conversor vendrá dada por $V_{\min} = \frac{V}{2^N}$, donde $V = 5$ Volts y $N = 10$; por lo que la menor variación de voltaje detectada por el ADC será $V_{\min} = 4,88 \cdot 10^{-3}$ Volts. Por otra parte, la pantalla LCD que usamos para mostrar los resultados tiene una resolución de $V_{\min}^{\text{screen}} = 1 \cdot 10^{-2}$ Volts, por tanto, la mayor fuente de incertidumbre la aporta la pantalla, y es de un orden de magnitud mayor. Las mediciones de corriente se realizan midiendo la caída de potencial

en una resistencia de valor conocido de muy buena calidad, por lo que asumimos que no aporta incertidumbres en la medición.

Luego de estas observaciones, la incertidumbre instrumental la consideramos constante en toda la medición, ya que todos los LED se caracterizaron bajo las mismas condiciones. Esta incertidumbre la acotamos por los valores máximos que puede aportar nuestro sistema, quedando entonces:

$$u_a \leq 7,07 \times 10^{-3} V$$

Por lo que la incertidumbre total queda $u_T = \sqrt{u_a^2 + u_b^2}$. Si consideramos que los valores reportados para la carga del electrón y la velocidad de la luz no aportan incertidumbres a las mediciones, entonces podemos concluir que en ambos métodos la incertidumbre que aporta el instrumento de medición sobre el valor que reportamos de la constante de Planck es $u_{h_1} = 7,07 \times 10^{-37} \text{ Js}$.

2.4. Análisis y discusión de los resultados

Siguiendo el procedimiento mostrado en la sección 1.4 para determinar la constante de Planck correspondiente al primer método, ajustamos por una recta la parte lineal de la curva I-V de cada LED, donde el intercepto con el eje de las abscisas es el voltaje de codo de cada LED. Con estos valores y las longitudes de onda de emisión de los LED, se resolvió gráficamente la ecuación (3), donde la pendiente de la recta de ajuste corresponde al valor de la constante de Planck. En la figura 6 se muestra el ajuste lineal realizado aplicando el primer método y se tabulan en la esquina inferior derecha los parámetros de ajuste obtenidos:

$$h_1 = (6,21 \pm 1,71) \times 10^{-34} \text{ J.s} \quad (7)$$

Siguiendo el procedimiento propuesto por el método II realizamos un ajuste lineal del gráfico de $\ln I(V)$ vs. V para cada uno de los LED, cuyos valores de pendiente e intercepto con el eje de las ordenadas se sustituye en la ecuación (6), la cual se grafica teniendo en cuenta los valores para cada LED (figura 7) y cuya pendiente es la constante de Planck:

$$h_2 = (4,61 \pm 0,5) \times 10^{-34} \text{ J.s} \quad (8)$$

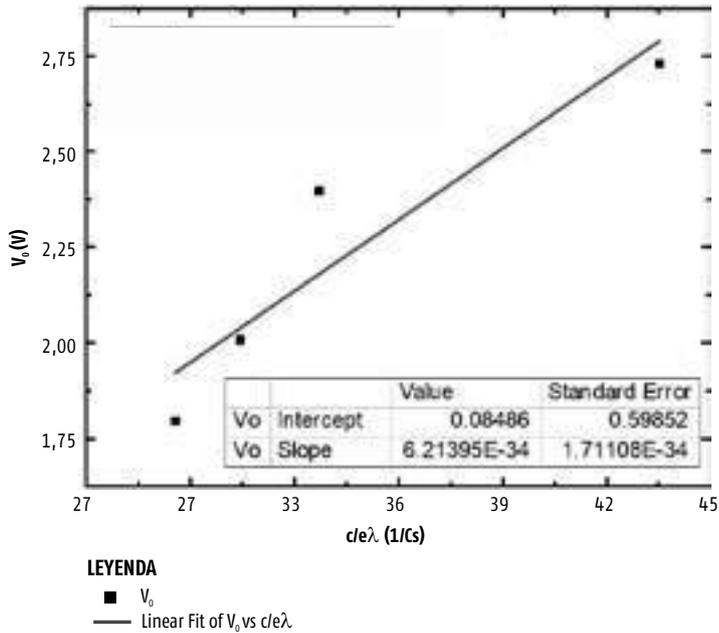


Figura 6. Ajuste lineal del voltaje de codo V_0 vs. $c/e\lambda$ utilizando el método I.

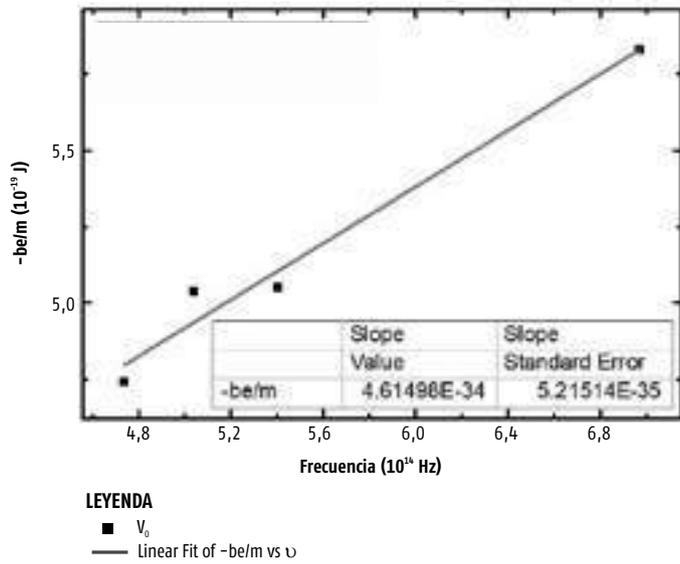


Figura 7. Ajuste lineal del voltaje de codo $-be/m$ vs. ν utilizando el método II.

A pesar de que el segundo método tiene mejores fundamentos teóricos, los resultados obtenidos por el primero arrojan valores más cercanos al que se reporta en la literatura para la constante de Planck. Esto se ve reflejado en las incertidumbres experimentales: la del primer método es mayor que la que obtuvimos por el segundo.

Conclusiones

Los métodos propuestos permiten obtener un valor numérico para la constante de Planck con buena aproximación al valor reportado en la literatura, y con relativamente baja incertidumbre experimental. Es una práctica de laboratorio que es posible implementar con pocos recursos, y mezcla importantes conceptos de la asignatura Física General V, como la teoría de semiconductores y la relación fundamental entre energía y frecuencia (longitud de onda). De manera simple también se pone al estudiante en contacto con la plataforma Arduino y con dispositivos electrónicos como el Lock-in, de amplio uso en mediciones experimentales en la investigación científica. Por último, la práctica permite el cálculo de una de las constantes fundamentales de la física a partir de una sencilla expresión matemática, lo cual siempre resulta muy elegante.

Bibliografía

- AARONS, A. B. y M. B. PEPPARD (1965): «Eistein's Proposal of the Photon Concept –A Translation of the *Annalen der Physik* Paper of 1905», *American Journal of Physics*, vol. 33, n.º 5, pp. 367-374.
- EISBERG, A. y R. RESNICK (1984): *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles*, La Habana: Editorial Pueblo y Educación.
- MARGOLIS, M. (2012): *Arduino Cook Book*, Sebastopol, California: O'Reilly Media.
- MELISSINOS, A. C. (1969): *Experiments in Modern Physics*, New York: Academy Press.
- SHOCKLEY, W. (1949): «The Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistors», *Bell System Technical Journal*, vol. 28, n.º 3, pp. 435-489.
- «The Nobel Prize in Physics 1921. Award Ceremony Speech» (1922), <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1921/ceremony-speech/>> [5/4/2018].
- ZHELUDEV, N. (2007): «The Life and Times of the LEDs -a 100- Year History», *Nature Photonics*, vol. 1, n.º 4, April, pp. 189-192, DOI: 10.1038/nphoton.2007.34.



Digitalización de las mediciones de los anillos de Newton

JESÚS ALBA,* B. PÉREZ,* T. MOLINA,* OCTAVIO CALZADILLA*

Introducción

La interferencia en películas delgadas es consecuencia de la división de una onda luminosa debido a la reflexión y refracción de la luz en las superficies delantera y trasera de la película. Si consideramos la película fina de aire que se forma cuando la superficie convexa de una lente convergente de baja curvatura toca en un punto la superficie plana de una placa de vidrio (figura 1), el patrón de interferencia observado toma forma de circunferencias concéntricas al ser iluminado por un haz de rayos paralelos de luz monocromática; estos son los llamados «anillos de Newton» (figura 2) (Hecht y Zajac, 1974, pp. 299-300).

En la figura 1 vemos que el rayo 1, al llegar a la película de aire, se refracta en la frontera lente-aire, para luego reflejarse en la superficie inferior de la película y entonces entrar al medio de la lente, después de refractarse en P, como el rayo 1' y cambiar su fase. Mientras tanto, el rayo 2 se refleja en P convirtiéndose en el rayo 2' sin cambiar de fase. Estos rayos se superponen en el punto P, provocando un cuadro de interferencia de máximos y mínimos (franjas claras y oscuras). Todos los puntos de la superficie de la cuña de aire que correspondan a igual espesor tendrán igual iluminación, por lo que va a dar lugar a una franja oscura o clara cuya forma dependerá de la geometría de la cuña. Para nuestro caso se observará un cuadro como el mostrado en la figura 2: en el punto de contacto (O) se verá una mancha circular oscura, rodeada de anillos concéntricos brillantes y oscuros cuyo grosor disminuye gradualmente al alejarse del centro (Hecht y Zajac, 1974, pp. 299-300).

* Facultad de Física, Universidad de La Habana, Cuba.

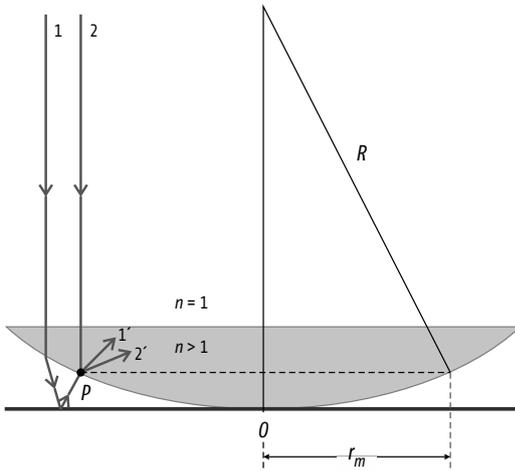


Figura 1. Representación de las ondas responsables del cuadro de interferencia sobre la película de aire formada entre la lente y la placa plana.

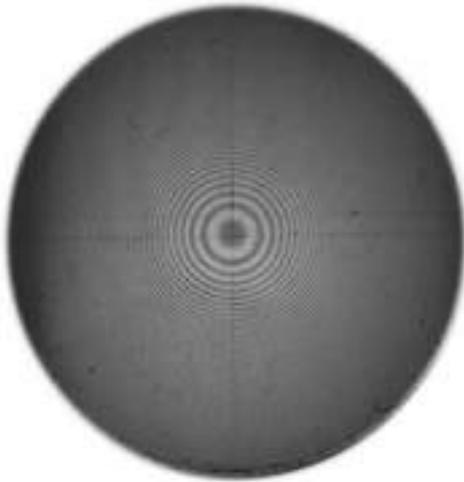


Figura 2. Patrón de interferencia conocido como «anillos de Newton». Se observan los retículos móvil y fijo.

Este fenómeno es empleado para calcular el radio de curvatura de la lente como práctica de laboratorio de óptica para estudiantes. En este cálculo se considera la expresión:

$$r_m^2 = m\lambda R \quad (1)$$

La expresión relaciona los radios de los anillos oscuros (r_m) con el radio de curvatura (R) de la superficie convexa de la lente y la longitud de la luz (λ) que ilumina al sistema formado por la lente y la superficie plana donde se apoya la superficie convexa de esta; m es el orden correspondiente a cada anillo.

En esta práctica se emplea un microscopio metalográfico para visualizar y medir los radios de los anillos. Para ello se coloca una lente convergente, por su superficie convexa, sobre una superficie plana reflectora. La luz monocromática que incide por el lateral es reflejada por el sistema interno del microscopio; esta llega a la superficie plana reflectora y al ocular micrométrico donde son observados los anillos de Newton (se observa una imagen similar a la mostrada en la figura 2).

El ocular micrométrico es un instrumento que permite medir pequeñas longitudes con gran precisión. Al mirar a través de este se observa en su interior un retículo en forma de cruz, con un trazo horizontal y dos trazos verticales y paralelos, uno fijo y otro que se desplaza a lo largo del horizontal, lo que nos permite colocarlo sobre las imágenes de objetos que se quieran identificar. El desplazamiento lateral se realiza por medio de un tornillo micrométrico que posee un vástago y un tambor graduado en 50 divisiones que, al rotar, avanza sobre el vástago. Cuando el tambor describe una vuelta completa, avanza (unidades de tambor). De esta manera se pueden medir las distancias entre los anillos que se observen por el ocular, al colocar el retículo vertical móvil sobre los mismos.

Las mediciones se realizan haciendo coincidir el retículo vertical móvil del ocular con los anillos oscuros, y anotando las lecturas correspondientes de la escala micrométrica del ocular. Se mide un sistema de anillos comenzando por aquel cuyo espesor sea comparable con el del retículo (comúnmente a partir del décimo anillo) y alcanzando el orden mayor que el estudiante sea capaz de medir (por lo general logra medir diez anillos a cada lado del círculo central). Esta operación se debe realizar como mínimo tres veces, lo que provoca que la duración de la práctica se prolongue por más de hora y media, con el cuidado de que el sistema lente-lámina de caras paralelas no se mueva en el transcurso de las mediciones, situación que se dificulta de manera considerable debido a las vibraciones que sufre la lente.

Por último, se realiza una calibración para hacer corresponder los valores de los radios de los anillos de interferencia medidos mediante

el ocular micrométrico con sus valores verdaderos. Esta consiste en colocar una escala milimétrica, que por lo general es un centímetro dividido en cien divisiones, sobre la platina y determinar la correspondencia entre las divisiones de la escala micrométrica del ocular y un milímetro de la escala milimétrica. La calibración debe expresarse en divisiones por milímetro (div/mm).

Esta práctica presenta un grupo de problemas en su diseño que afectan la calidad de la medición, así como el objetivo instructivo que se busca lograr con los estudiantes. Los problemas son enumerados y detallados a continuación.

1. Estabilidad del patrón. Debido a diversas perturbaciones (ruido ambiental, corrientes de aire, vibraciones producto de la manipulación del microscopio, etc.) el lente puede vibrar encima de la placa plana, lo que provoca que el patrón vibre y, en el peor de los casos, se desplace la lente; se pierden así las mediciones realizadas.
2. Pocos anillos. Debido a la geometría de la película de aire, las franjas que se forman no presentan en todo su espesor la misma amplitud de la onda. Luego, localizar la posición del mínimo se dificulta para los primeros anillos dado que el espesor de la franja es mayor que el del retículo. De igual manera, los anillos más externos, si bien son estrechos como el retículo, se hacen más cercanos, lo que impide al usuario resolver dos anillos externos consecutivos; esto limita el número máximo de anillos que se puede medir. Por lo tanto, el número de anillos se ve disminuido en gran medida.
3. Demora de la práctica. Debido a las dificultades y a la forma en la que se realizan las mediciones, los estudiantes emplean un tiempo medio de 1 hora y 30 minutos para realizar las mediciones.

En este trabajo proponemos un método que elimine los problemas antes descritos, mejore la calidad de las mediciones y ejercite a los estudiantes en el empleo de programas para analizar imágenes.

Método *software*

Este nuevo método, al cual llamaremos «método *software*», consiste en tomar una fotografía digital de los anillos de Newton a través del ocular del microscopio. Para ello se requiere un teléfono inteligente con una cámara de al menos doce megapíxeles. Una de las imágenes obtenidas es la mostrada en el figura 2. Previamente se separaron los retículos móvil y

fijo del ocular micrométrico una distancia de 0,1 mm, de manera que esta fuese una escala de medida para emplear en las mediciones posteriores.

La imagen digital es importada en el *software* libre Gwyddion 2.51. Esta es una herramienta para la visualización y análisis de datos de microscopio de sonda de barrido, permite realizar perfiles de una imagen y sacar automáticamente los picos máximos de esos perfiles (figura 3).

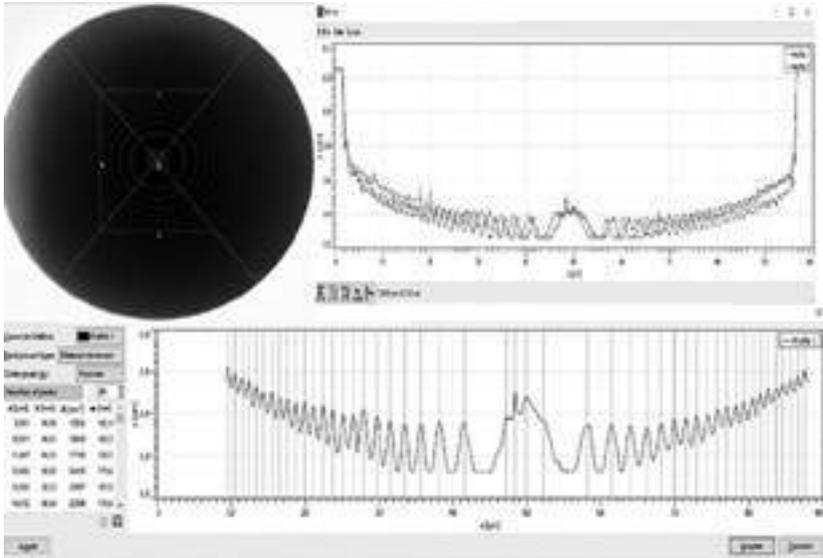


Figura 3. Ubicación del centro de los anillos. Selección de perfiles que pasan por el centro. Se selecciona cada uno para marcar automáticamente la posición de los picos que corresponden a las posiciones de los anillos.

Una vez importada la imagen en el Gwyddion, se procede a su análisis. Primeramente, se debe hacer una ubicación del centro de los anillos. Para ello es necesario hacer una construcción geométrica como la mostrada en la figura 3.

La construcción consiste en un rectángulo (solo se dibujan tres de sus lados por simplicidad) cuyos vértices se encuentran sobre uno de los anillos (se recomienda que sea uno de los más finos), de manera que al trazar las diagonales del rectángulo estas se corten en el centro del anillo. Esas diagonales ya pueden ser empleadas como perfiles porque son, a su vez, diámetros de los anillos.

Seleccionados los perfiles, se procede a localizar los picos. En la versión 2.51 del Gwyddion es posible emplear la herramienta de buscar picos

(versiones previas no presentan esta herramienta); queda como se muestra en la figura 3. Con los picos correctos localizados es posible extraer estos datos y analizarlos después para calcular el radio de curvatura.

Para la determinación de las incertidumbres asociadas a ambos procedimientos se empleó el método de mínimos cuadrados. A partir de la expresión (1) se puede graficar r_m^2 en función del orden del anillo m , y queda una recta cuya pendiente resulta igual a λR (López, Molina y Calzadilla, 2012; Calzadilla, Carreras y Yuste, 2015).

Con el objetivo de realizar una comparación para validar el nuevo método, se tomaron dos fotografías de los anillos de Newton correspondientes a dos lentes diferentes (LP y L6), tomadas en dos microscopios con diferentes aumentos. Adicionalmente, en esas mismas condiciones se midieron los radios de los anillos por el método manual. Los resultados de los cálculos se muestran en la siguiente sección.

Resultados

En las figuras 4 y 5 se muestran los resultados del cálculo de los radios de los anillos para las dos lentes de estudio por los dos métodos descritos en este trabajo. Se observa la marcada diferencia entre la cantidad de anillos que es posible medir por el método *software* en comparación con el método manual, pese a que en este la medición incluyó todos los primeros anillos y se logró superar el orden de 30 en ambos casos.

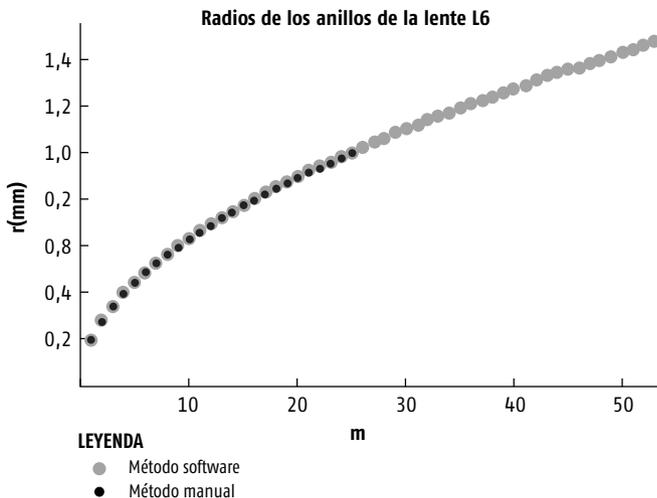


Figura 4. Valores de los radios de los anillos correspondientes a la lente L6, medidos por ambos métodos.

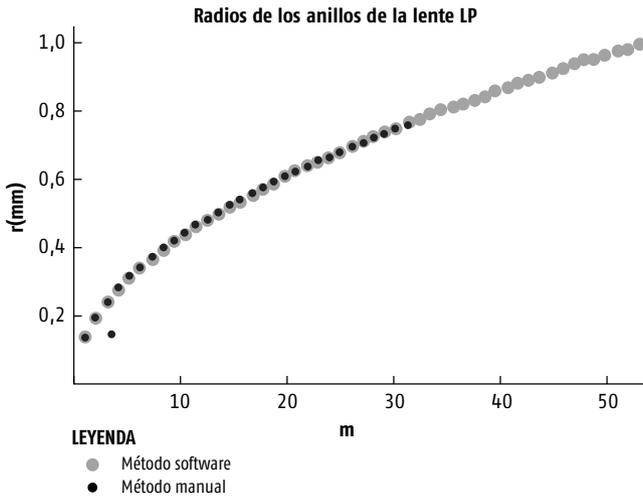


Figura 5. Valores de los radios de los anillos correspondientes a la lente LP, medidos por ambos métodos.

Los valores de los radios de curvatura obtenidos por ambos métodos, así como sus respectivas incertidumbres, calculados por mínimos cuadrados se resumen en la tabla 1.

TABLA 1. Valores de los radios (mm)

LENTE	MÉTODO MANUAL		MÉTODO SOFTWARE	
	\bar{R}	ΔR	\bar{R}	ΔR
LP	32,81	0,06	33,02	0,03
l6	67,91	0,29	68,53	0,05

En la tabla 1 se observa que ambos métodos son bastante exactos y no existe una diferencia marcada en los resultados obtenidos. Sin embargo, los valores de las incertidumbres correspondientes al método *software* resultan menores que las del manual. La diferencia marcada se encuentra en la simplicidad y rapidez con la que se realiza la medición en el caso del método *software*, además que este último permite tener mayor cantidad de mediciones de los radios de los anillos, así como mayor número de estos. Otro elemento importante es que permite ubicar de manera más exacta el mínimo de la franja, tanto en las gruesas como en las delgadas, tarea que no era posible en el caso del método manual.

Conclusiones

En el presente artículo se realizó un análisis del método de medición del radio de curvatura de una lente por medio de un microscopio metalográfico. Se identificaron tres problemas esenciales en este método: la estabilidad del patrón se ve comprometida por vibraciones en el ambiente durante la medición, no es posible medir muchos anillos a causa de la poca exactitud al identificar el mínimo de interferencia y a la dificultad de resolver los últimos anillos debido a su cercanía. A pesar de que la medición toma mucho tiempo en realizarse, no se obtienen muchas mediciones de cada anillo. Estas problemáticas fueron solucionadas con el nuevo método propuesto en este artículo, llamado «método *software*».

El método soluciona los problemas de estabilidad del patrón producto de las vibraciones provenientes del ambiente. Permite, además, la medición de un mayor número de anillos, así como la ubicación del mínimo de la franja oscura con una mayor exactitud. Disminuye considerablemente el tiempo que los estudiantes tienen que emplear para realizar la medición, en comparación con el método anterior. Asimismo, se logra obtener valores más exactos de los radios de curvatura. Por último, este método, aplicado a la práctica de laboratorio, resulta en un entrenamiento en el empleo de *software* para el análisis de imágenes y patrones, muy necesarios en las investigaciones científicas.

Bibliografía

- CALZADILLA, O.; C. CARRERAS y M. YUSTE (2015): *Nociones de incertidumbre en la medición*, La Habana: Editorial Universitaria Félix Varela.
- HECHT, E. y A. ZAJAC (1974): *Optics*, Reading (Massachusetts): Addison-Wesley.
- LÓPEZ, N.; T. MOLINA y O. CALZADILLA (2012): «Análisis de las incertidumbres en los anillos de Newton», ponencia, VI Taller Iberoamericano de Enseñanza de la Física Universitaria, Colegio Mayor de San Gerónimo, Universidad de La Habana.



Experiencia sobre el desarrollo de habilidades experimentales en la asignatura Física utilizando aplicaciones móviles

ROSAIME GONZÁLEZ DE LOS REYES,* ODALYS PORTELA LÓPEZ**

Introducción

La física, como ciencia, se ocupa del estudio de la materia y su estructura, de las formas físicas de movimiento de los cuerpos: mecánico, térmico, electromagnético, cuántico, atómico, nuclear y subnuclear, que son las más simples y generales (Ardila, 2012, p. 35).

Como asignatura básica, complementa los modos de actuación de los futuros ingenieros. En ella descansan los sistemas de conocimientos de algunos elementos afines, en su relación con otras asignaturas, que contribuyen a elevar el nivel de los estudiantes y, con ello, al reconocimiento por parte de estos del valor del contenido. Además, la física, como ciencia, desde su objeto estudia una gran parte de los fenómenos, tanto a escala macroscópica como microscópica, presentes en el objeto y campo de acción del estudiante en formación. También puede interrelacionarse por su objeto, lógica y métodos con la lógica y métodos de la profesión para penetrar desde una visión no solo científico-técnica, sino también sociocultural, en la formación integral de la personalidad de los futuros profesionales.

Por ello, una alternativa para mejorar su proceso de enseñanza es la utilización de medios que nos permitan ilustrar, medir magnitudes físicas, realizar demostraciones teóricas y prácticas en el laboratorio con experimentos conducentes a la resolución de problemas, pues esa resolución es una de las formas de aprender, más como una estrategia

* Departamento de Relaciones Internacionales, Oficina de Colaboración, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cuba.

** Departamento de Gráfica, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cuba.

de enseñanza que como un simple ejercicio de aplicación de una teoría. Hodson (1994) ha analizado hasta qué punto se cumplen los objetivos que se plantean con las prácticas de laboratorio, en particular cómo aumentar la motivación, enseñar técnicas de laboratorio, desarrollar una visión aceptable de la naturaleza de la actividad científica y mejorar el aprendizaje de los conocimientos promoviendo determinadas actitudes científicas. La participación en la cultura científica mediante la realización de problemas en pequeños grupos refleja el carácter social de la ciencia (Jiménez, Álvarez y Reigos, 1998).

En la enseñanza, el trabajo experimental forma parte intrínseca de todas las ciencias, fundamentalmente de las naturales y exactas; en los diseños de los programas de las disciplinas y las asignaturas se les dedica un número elevado de horas, en las que los estudiantes no solo comprobarán las principales regularidades de los fenómenos, leyes y teorías, sino que podrán adquirir habilidades experimentales.

Se han abordado aspectos teóricos sobre el desarrollo del método experimental en física en la mayoría de las investigaciones realizadas para estudiar la efectividad del trabajo práctico en la enseñanza de las ciencias, los cuales no muestran resultados concluyentes. El papel que esta ha ocupado en el transcurso de los siglos xx y xxi ha sido siempre objeto de controversia. En los años sesenta, proyectos desarrollados en los Estados Unidos, como Biological Sciences Curriculum Study (BSCS), Chemical Elaboration Material Study (CHEM) y Physical Sciences Study Commette (PSSC), realizaron una fuerte promoción de un estilo de enseñanza en la que el trabajo práctico realizado por los alumnos los debía conducir a los fundamentos de los conceptos, de modo que el profesor ocuparía un papel de apoyo y guía para que los alumnos descubriesen nuevos elementos teóricos (Barberá y Valdez, 1996). Desde entonces los profesores han considerado el trabajo práctico como una estrategia educativa útil para conseguir casi cualquier objetivo planteado.

En la década de los setenta se señalaba que para mejorar la eficiencia del trabajo experimental se debía superar el obstáculo que suponen las diferentes expectativas con respecto a él de los colectivos de profesores y estudiantes. Se plantea que hay que estrechar vínculos entre lo que se realiza en el laboratorio y el contenido teórico de las clases.

La enseñanza de la física en Cuba, en esta misma década, se enfoca en el trabajo independiente o autonomía de los alumnos y la atención se dirige, entonces, al laboratorio (Universidad Tecnológica de La Habana, 2005).

El desarrollo de las habilidades experimentales les permite a los estudiantes aplicar los conocimientos adquiridos en la solución de una tarea dada de carácter cognoscitivo; en ella intervienen, además de los hábitos, de los propios conocimientos, un sistema de acciones lógicas fundamentales vinculadas al proceso docente.

La realización de todas aquellas acciones que comprenden la habilidad requiere siempre de un intenso control sistemático que garantice su dominio y el logro de la destreza. Las habilidades experimentales, como segundo componente del contenido de enseñanza, son el dominio consciente y exitoso de la actividad. Su proceso de formación es complejo y está indisolublemente ligado a la formación de los conocimientos (Ginoris, 2009).

Los docentes siempre han buscado y logrado alternativas para el desarrollo de la actividad experimental y de las que corresponden al proceso de formación del estudiante; o sea, en la educación no se trata solo de comprobar las leyes, este proceso entraña una actividad pedagógica intensa que es posible lograr con el uso de los modelos pedagógicos y didácticos adecuados a sus fines.

Actualmente hay que aprovechar la experiencia de los estudiantes con sus dispositivos móviles, lo cual reafirma lo planteado por Brazuelo (2015) sobre lo que se conoce como «*M-Learning*» (aprendizaje a través de dispositivos móviles portables). Esta modalidad educativa que facilita la construcción del conocimiento, la resolución de problemas de aprendizaje y el desarrollo de destrezas o habilidades diversas, de forma autónoma, podría darle solución a grandes problemas en una asignatura como la Física.

Estos sistemas de cómputo propios de los estudiantes, como laptops, tabletas, celulares, son herramientas tecnológicas educativas que en la mayoría de las ocasiones no utilizamos para mejorar el proceso de enseñanza de una asignatura por miedo a romper las tradiciones de la enseñanza. Pero el reto pedagógico consiste precisamente en utilizar recursos didácticos, como una aplicación móvil, para desarrollar habilidades experimentales en los estudiantes.

La actividad creadora de un laboratorio forma parte del sistema de conocimientos y habilidades que se manifiestan en los estudiantes a través de la solución de problemas, el desarrollo de la imaginación, la creatividad y la independencia cognoscitiva (Valencia, 2017; Rodríguez, 2017).

Señala Álvarez de Zayas (1999): «Las habilidades, al formar parte del contenido de una disciplina, caracterizan, en el plano didáctico, a

las acciones que el estudiante realiza al interactuar con el objeto de estudio con el fin de transformarlos, y de humanizarlos» (p. 3).

No obstante, los fundamentos empírico-inductivos, plantean que el experimento es la fuente fundamental del conocimiento científico y toda experiencia debe comenzar con la observación, que es equivalente a la percepción.

1. Metodología

El estudiante de ingeniería necesita desarrollar habilidades experimentales que le permitan un ágil desarrollo del saber hacer, y esto se logra mediante la actividad experimental realizada desde las clases prácticas hasta las experiencias de laboratorio. Estas actividades se llevan a cabo mediante diferentes metodologías aplicadas en los diferentes tipos de experimentos.

La investigación se realizó en el segundo año del curso regular diurno de la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones. Se contó con una población de dos grupos (50 estudiantes) del curso 2017-2018. La asignatura impartida fue Electromagnetismo y Óptica, correspondiente al Plan D, y fueron planificadas dos prácticas de laboratorios, de una hora cada una. El análisis partió de la realización del propio laboratorio, con su evaluación práctica: la práctica de polarización de la luz y la característica voltampérica, con el objetivo de identificar magnitudes físicas, confeccionar gráficos y realizar la comprobación experimental de leyes físicas. El método empleado fue el inductivo-deductivo, a través de la observación experimental, con apoyo en aplicaciones Android del celular en el montaje de la práctica. Para el procesamiento estadístico se utilizó como medida descriptiva el análisis de incertidumbre.

Teniendo en cuenta que es indispensable para la formación y el desarrollo de cada habilidad el dominio de una serie de acciones en la solución de una tarea dada, se siguió una estrategia que se fue desarrollando durante la impartición de la asignatura. Para ello, se asumieron los siguientes requerimientos:

- Declaración de objetivo de cada experimento.
- Identificación del fenómeno físico.
- Establecimiento de la secuencia de acciones u operaciones.
- Realización de ejercicios teóricos y prácticos.
- Aplicabilidad en la especialidad.

En el desarrollo de la práctica de integración se dividió el grupo en dos equipos, uno para la práctica de óptica y el otro, la de electromagnetismo. Para medir los resultados se tuvieron en cuenta algunas de las habilidades experimentales de la asignatura: medición de magnitudes físicas, análisis de datos y diseño de gráficos. Los estudiantes, de forma independiente, debían:

- Montar el esquema experimental.
- Observar el fenómeno.
- Utilizar los instrumentos y aplicaciones móviles.
- Interpretar y representar los resultados.

1.1. Práctica del equipo I

Los estudiantes debían estudiar los conceptos relacionados con la luz polarizada y medir el grado de polarización debido a un rayo emitido por un láser semiconductor con 650 nm de longitud de onda, siendo la luz incidente parcialmente polarizada; de esta manera, cuando $0^\circ < \phi < 90^\circ$, la intensidad (I) se mantiene entre los valores máximo y mínimo. Por tanto, se puede distinguir la luz linealmente polarizada, la luz natural y la luz parcialmente polarizada, con base en la variación de la intensidad transmitida (Young y Freedman, 2009).

Como ejercicio, los estudiantes debían verificar la ley de Malus, determinar la dirección del eje de transmisión del polarizador y ajustar la luz polarizada, la cual es paralela o perpendicular al plano de incidencia. Además, debían determinar la intensidad de la luz utilizando las aplicaciones móviles (Phyisc Toolbox) y realizar gráficos, como se muestra en las tablas 1 y 2.

La tabla 1 describe, en la primera columna, los valores de ángulos que son variados cada diez grados por el polarizador. La segunda columna refleja los valores de intensidad de la luz, obtenidos en este caso utilizando aplicaciones (All Tools y Phyisc Toolbox) a través del sensor del teléfono celular. La tercera columna muestra los valores de coseno del ángulo. Para la construcción del gráfico de logaritmos neperianos de la intensidad de la luz contra logaritmo del coseno de la fase expresada como: $\ln(I)$ vs. $\ln(\cos \phi)$, fue necesario calcular la pendiente y comprobar si se cumplía la ley de Malus, descrita por la expresión siguiente

$$I = I_m \cos^2 \phi \quad (1)$$

donde:

I : intensidad transmitida por el polarizador

I_m : intensidad incidente en el polarizador

\emptyset : ángulo que forma el vector intensidad del campo eléctrico entre los ejes de polarización del polarizador y el analizador.

Tabla 1. Intensidad de la luz (I) y ángulo (\emptyset), mediante las aplicaciones All Tools y Physisc Toolbox (equipo I)

\emptyset (°)	I (W)			
	ALL TOOLS	PHYSICS TOOLBOX	INFLUENCIA DE LA LUZ NATURAL	COS \emptyset (RAD)
0	84,00	84,00	107,00	1,00
10	83,00	84,00	104,10	0,98
20	81,00	82,00	99,70	0,94
30	77,00	75,00	94,30	0,87
40	66,00	46,00	88,80	0,77
50	38,00	36,00	84,80	0,64
60	24,00	24,00	81,80	0,50
70	12,00	12,00	80,20	0,34
80	3,00	3,00	79,50	0,17
90	0,00	0,00	81,80	0,00

Tabla 2. $\ln(I)$ y $\ln \text{COS } \emptyset$

ANDROID	LN (I)	LN (COS \emptyset)
	INFLUENCIA DE LA LUZ NATURAL	
4,43	4,67	0,00
4,42	4,65	-0,02
4,40	4,60	-0,06
4,33	4,55	-0,14
4,03	4,49	-0,26
3,61	4,44	-0,45
3,18	4,40	-0,69
2,48	4,38	-1,08
1,10	4,38	-1,77
∞	∞	0,00

Para el análisis estadístico y la construcción de gráficos se utilizó la calculadora gráfica de Matlab para Android. Ambos equipos emplearon el método de los mínimos cuadrados utilizando las ecuaciones 2 y 3 respectivamente y el cálculo de la incertidumbre:

$$m = \frac{\overline{xY} - \bar{x} \cdot \bar{Y}}{\overline{x^2} - (\bar{x})^2} \tag{2}$$

Donde m es la pendiente de la recta con cada uno de los valores medios y valores cuadráticos medios mostrados en la tabla 3.

La ecuación 2 representa la pendiente y la 3 el intercepto para la construcción de gráficos, elemento en el cual, por lo general, los estudiantes presentan dificultades.

$$n = \bar{Y} - m\bar{x} \tag{3}$$

Donde n es el intercepto de la recta.

Durante la realización de la práctica al sistema experimental real se le cambió el luxómetro por la aplicación del teléfono.

Tabla 3. Datos organizados para el cálculo con mínimos cuadrados utilizando aplicaciones para dispositivos Android

ANDROID				
I	X _i	Y _i	X _i Y _i	X _i ²
1	4,43	0,00	0,0000	19,63
2	4,42	-0,02	-0,0894	19,58
3	4,40	-0,06	-0,2723	19,37
4	4,33	-0,14	-0,6031	18,76
5	4,03	-0,26	-1,0521	16,20
6	3,61	-0,45	-1,6115	13,04
7	3,18	-0,69	-2,2029	10,10
8	2,48	-1,08	-2,6807	6,17
9	1,10	-1,77	-1,9467	1,21
10	∞	0,00	∞	∞
	31,98	-4,47	-10,46	124,06
Promedio	3,55	-0,50	-1,16	13,78
	\bar{x}	\bar{Y}	\overline{xY}	\bar{x}^2

1.2. Práctica del equipo II

Utilizando la aplicación Every Circuit, los estudiantes diseñaron su propio circuito a partir de haber observado la práctica real. La figura 1a muestra una representación de la característica voltampérica de un resistor; la figura 1b, el montaje de la característica voltampérica de un

diodo semiconductor polarizado en directa; y la figura 1c, un diodo polarizado en inversa.

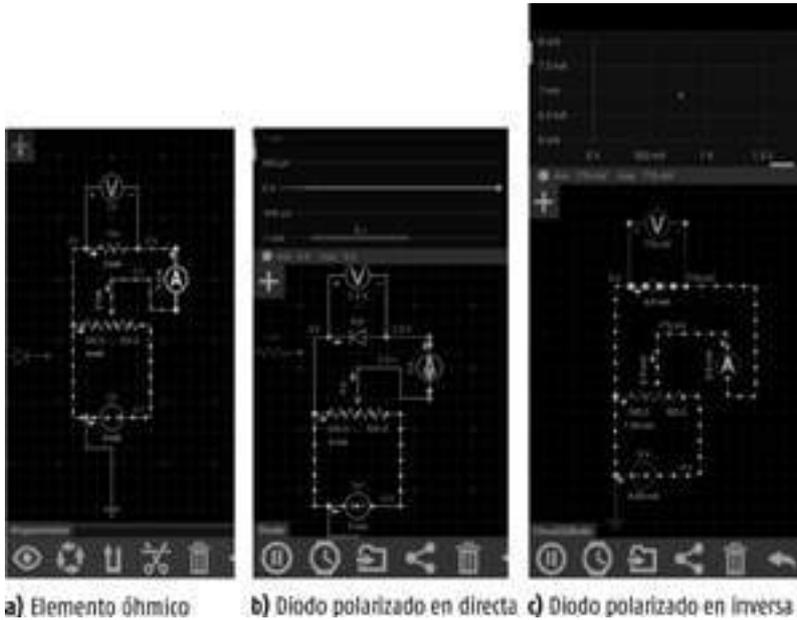


Figura 1. Diseño en la aplicación Every Circuit.

Como resultado de la práctica, pudieron comprobar que para determinados elementos la intensidad de la corriente es proporcional a la diferencia de potencial aplicada, y que la constante proporcionalidad es una característica del elemento denominada «resistencia eléctrica», la cual es una medida de la oposición del elemento al paso de la corriente eléctrica. Matemáticamente esta ley se expresa de la forma:

$$V = I \cdot R \quad (4)$$

Donde R es un parámetro que no depende de voltaje ni de intensidad de la corriente.

2. Análisis según la intención del docente

Tradicionalmente, este tipo de práctica lleva título, objetivos, fundamentación teórica, montaje del experimento, métodos

estadísticos, conclusiones, así como la discusión. Esta es realizada con la intención de romper los cánones tradicionales.

Desde ese punto de vista, se puede extraer de ella la concepción de lo experimental en la asignatura como ciencia. Está implícita en su quehacer pedagógico una visión positivista del conocimiento, el pensamiento inductivo en la simple comprobación de las leyes naturales y universales, que muestra una ciencia única, inmutable, concebida como un conjunto de resultados o productos, sin darle relevancia al proceso en sí mismo.

Ante las dificultades que todo cambio implica, el camino elegido es la paulatina incorporación de las aplicaciones móviles en los laboratorios de física, de modo que las nuevas tecnologías favorezcan una modificación sustancial en la manera de desarrollar el experimento, para adquirir datos u obtener mediciones que se realizaban de manera tradicional, montar en tiempo real un circuito o, en el caso de la práctica de polarización, tomar muestras temporales de cómo va variando la intensidad de la luz. Todo ello tiene la intención de lograr autonomía por parte del estudiante en la búsqueda de los fundamentos teóricos de las prácticas, gracias a la incorporación de los programas informáticos.

3. Análisis y presentación de resultados

La comprensión del objetivo, desde el comienzo del trabajo experimental de ambos equipos, estaba ya prelaborada. Sin embargo, el primer equipo no fue más allá de los conceptos básicos de la luz polarizada. Se cumplió con el objetivo de determinar la intensidad de la luz utilizando las aplicaciones móviles Physisc Toolbox y All Tools. No se tuvo en cuenta el valor infinito para la realización del gráfico de $\ln(I)$ y $\ln(\cos\theta)$.

Algo importante a resaltar es el grado de concordancia entre los resultados de las mediciones al efectuarlas bajo diferentes condiciones de medida (en la práctica de polarización se cambió el luxómetro por las aplicaciones Android). En esto se debe ser muy cuidadoso a la hora de realizar la práctica y tener en cuenta las condiciones de luz en el laboratorio. Aquí se hace alusión al grado de concordancia entre los resultados de sucesivas mediciones del mismo mensurando, efectuando las mediciones con la aplicación Android y de la totalidad de las condiciones de medición.

En el caso de la expresión de las unidades, ambos equipos fueron cuidadosos al expresar solo el número (sin la unidad) para los valores

de incertidumbre. No ocurrió de la misma manera en cuanto a la cantidad de cifras decimales o significativas en los resultados.

Las mayores dificultades para ambos equipos estuvieron en la realización de los gráficos: para el equipo I, en el trabajo con la expresión logarítmica y para el II, en la gráfica del elemento no óhmico, debido a que era necesarias ulinealización.

Quedaron pendientes dos aspectos para los próximos laboratorios:

- El trabajo sobre un teorema en acción detectado, particularmente persistente: «A mayor número de mediciones se compensan los errores, incluso los sistemáticos».
- La inclusión no solo de los *software* Matlab y Excel utilizados para computadora en la confección de los gráficos y el cálculo de incertidumbre, sino también en la realización de estos con la calculadora de Matlab para sistema Android.

Solamente el equipo II realizó una búsqueda, para desarrollar el tema de la aplicabilidad del laboratorio en la especialidad; algo en lo que se debe de trabajar intensamente, porque es lo que permite reafirmar la teoría con la práctica.

Las tablas 4 y 5 muestran los resultados docentes obtenidos en la asignatura durante dos cursos consecutivos.

Tabla 4. Resultados de la prueba final. Física II. Curso 2015-2016. Telecomunicaciones

GRUPOS	PRESENTADOS	% APROBADOS VS. PRESENTADOS	% APROBADOS VS. MATRÍCULA
21	28	78,6	71,0
22	16	56,3	33,3
23	27	74,1	71,4
24	24	75,0	66,7
Total	95	72,6	61,6

Tabla 5. Resultados de la prueba final. Física II. Curso 2017-2018. Telecomunicaciones

GRUPOS	PRESENTADOS	% APROBADOS VS. PRESENTADOS	% APROBADOS VS. MATRÍCULA
21	17	70,6	54,5
22	16	75,0	50,0
23	14	78,6	52,4
24	16	87,5	51,9
Total	63	77,8	52,1

Conclusiones

Como resultado de la experiencia realizada se pudo constatar que el desarrollo de las habilidades experimentales está registrado en los diferentes planes de estudio y documentos normativos propios de la especialidad. Quedó claro que aún no resultan suficientes las indicaciones metodológicas para su desarrollo, pues no se reconoce su carácter procesal.

En este tipo de actividad, el estudiante reproduce cabalmente las orientaciones dadas en el documento (guía) elaborado por el profesor o colectivo de profesores, quienes determinan qué acciones deben hacer los estudiantes y cómo proceder, de modo que estos no tienen la oportunidad para razonar porqué se tiene que operar así o realizar esas mediciones y no puede ser de otra forma. Esto muestra un proceso repetitivo, algo que debemos eliminar en la medida en que avanza el proceso de enseñanza de la asignatura.

La utilización del celular en este tipo de actividad permite el desarrollo de las siguientes habilidades experimentales: diseño y observación del fenómeno, obtención de una data experimental, análisis gráfico de los resultados y conclusiones. Además, sería de ayuda para realzar el uso de las tecnologías educativas con vistas a mejorar el proceso de enseñanza de la física experimental; también con el objetivo de motivar a los estudiantes por el estudio de esta asignatura y lograr una mejora en la promoción.

Recomendamos, por tanto, insertar la práctica dentro de las propuestas en el nuevo plan de estudio; asimismo, realizar el instructivo del laboratorio para ser usado por los alumnos e implementar otras prácticas en sistema Android para Física I y III.

Bibliografía

- ÁLVAREZ DE ZAYAS, C. M. (1999): *Didáctica. La escuela en la vida*, La Habana: Editorial Pueblo y Educación.
- ARDILA, J. C. (2012): «Reflexiones sobre la didáctica en física desde los laboratorios y el uso de las TIC», *Revista Virtual Universidad Católica del Norte*, n.º 35, febrero-mayo, <<https://revistavirtual.ucn.edu.co/index.php/RevistaUCN/article/view/354>> [12/2/2019].
- BARBERÁ, D. y P. VALDEZ (1996): «El trabajo práctico en la enseñanza de las ciencias: una revisión», *Enseñanza de las Ciencias*, n.º 3, pp. 365-379.
- BRAZUELO, F. (2015): «Estudio de adaptabilidad para dispositivos móviles en plataformas MOOC», *Revista de Educación a Distancia*, vol. 47, n.º 1, octubre, <<http://www.um.es/ead/red/47>> [12/2/2019].

- GINORIS, O. (2009): *Fundamentos didácticos de la educación superior cubana*, La Habana: Editorial Félix Varela.
- HODSON, D. (1994): «Hacia un enfoque más crítico del trabajo de laboratorio», *Enseñanza de las Ciencias*, vol. 12, n.º 3, <<https://www.raco.cat/index.php/Ensenanza/article/view/21370/93326>> [12/2/2019].
- JIMÉNEZ, M. P.; V. ÁLVAREZ y C. REIGOS (1998): «Argumentación en el laboratorio de Física», ponencia, Encuentro de Pesquisa no Ensino de Física, Florianópolis, octubre.
- RODRÍGUEZ, A. (2017): «Experiencia sobre el desarrollo de habilidades prácticas en la asignatura de Química Básica y Orgánica, en la carrera de Medicina Veterinaria y Zootécnica», *Revista Cubana de Educación Superior*, vol. 12, n.º 3, La Habana, pp. 299-313.
- UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA HABANA JOSÉ ANTONIO ECHEVERRÍA (2005): *Física General. Materiales para el profesor y los alumnos de Agronomía*, CD-ROM, La Habana.
- VALENCIA, H. A. (2017): «Estrategia de superación profesional dirigida al desarrollo de la competencia docente en el deporte voleibol para la Secundaria Básica, desde una perspectiva CTS», en *Ciencia e Innovación Tecnológica*, vol. 1, La Habana: Editorial Académica Universitaria.
- YOUNG, H. D. y R. A. FREEDMAN (2009): *Física universitaria con Física moderna*, México D. F.: Addison Wesley.



Determinación del momento dipolar magnético de un imán permanente por dos métodos distintos y comparación de sus resultados

ARCELIO HERNÁNDEZ FERREIRA,* OTHMAN ESPINOSA VALDÉS*

Introducción

El momento dipolar magnético de un imán permanente es una magnitud física que lo caracteriza y que condiciona el campo magnético producido por este imán en sus alrededores, así como su interacción con los campos magnéticos generados por otros dispositivos en ciertas circunstancias particulares.

En un imán permanente comúnmente se supone que la imanación del material es homogénea y uniforme y, como consecuencia de ello, el vector magnetización M es constante en su volumen. El imán se comporta como un dipolo magnético con una disposición de las líneas del vector inducción magnética saliendo por el polo norte y entrando por el sur. El momento dipolar magnético del imán se representa como un vector que va del polo sur al norte y puede representarse de forma equivalente como una espira de área A por la que circula una corriente i . Su valor sería iA .

Partiendo de la expresión del potencial magnético vectorial \vec{A} para un dipolo magnético de momento $\vec{\mu}$ dada por:

$$\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\vec{\mu} \times \vec{r}}{r^3} \quad (1)$$

podemos encontrar el vector inducción magnética a través de su rotacional $\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$. Este desarrollo aparece en múltiples libros de texto y finalmente conduce a:

* Departamento de Física, Facultad de Ingeniería, Universidad de Cienfuegos, Cuba.

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\frac{3r(\vec{\mu} \cdot \vec{r})}{r^5} - \frac{\vec{\mu}}{r^3} \right] \quad (2)$$

Si expresamos este resultado en coordenadas cilíndricas suponiendo que el momento magnético $\vec{\mu}$ está según la dirección del eje z , obtenemos las componentes del vector \vec{B} según el eje z (B_z) y según la dirección radial (B_ρ):

$$B_\rho = \frac{3\mu_0\mu}{4\pi \cdot (\rho^2 + z^2)^{\frac{5}{2}}} z\rho \quad (3)$$

$$B_z = \frac{\mu_0\mu}{4\pi} \frac{2z^2 - \rho^2}{(\rho^2 + z^2)^{\frac{5}{2}}} \quad (4)$$

Si nos movemos a lo largo del eje z donde $\rho = 0$, entonces $B_\rho = 0$ y B_z solo depende de la posición z de acuerdo con la expresión:

$$B_z = \frac{2\mu_0\mu}{4\pi \cdot z^3} \quad (5)$$

Esta expresión relaciona la magnitud del campo magnético producido por un imán permanente con el momento magnético de valor μ dirigido según el eje z con la distancia z desde su centro. Midiendo ambas magnitudes (B_z y z) y empleando la misma determinaremos μ .

También es conocida la interacción de un dipolo magnético con un campo magnético uniforme, el cual ejerce un torque dado por: $\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$. Si colgamos el imán permanente de un hilo largo que no ejerce torque restaurador en una región con campo magnético, despreciando la fuerza de fricción, podemos plantear la ecuación de su movimiento de rotación respecto al eje giro: $\vec{\tau} = I\vec{\alpha} = I \frac{d^2\theta}{dt^2}$, la cual, en términos de las magnitudes de escalares y para ángulos de desviación pequeños ($\sin\theta \approx \theta$) puede escribirse:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{\mu B}{I} \theta = \omega^2 \theta \quad (6)$$

De aquí se puede relacionar el cuadrado de la frecuencia angular de oscilación con la razón giro magnética del imán (relación entre su momento dipolar magnético y su momento de inercia respecto al eje de giro) y el campo magnético resultante actuando sobre el imán. Considerando la acción de la componente horizontal del campo magnético terrestre B_{ext} y el campo generado por el solenoide $B_{sol} = K_{sol} i$, queda:

$$\omega^2 = \frac{\mu B_{ext}}{I} + \frac{\mu K_{sol}}{I} i \quad (7)$$

Empleando esta ecuación a través de mediciones de $\omega^2 ei$ también se puede determinar μ .

Materiales y métodos

En el primer método empleamos un montaje experimental como el que se muestra en la figura 1, que consta de un láser He-Ne, un banco óptico de carril y un teslámetro con precisión de 1 mT.

Para garantizar que las mediciones se efectuaran a distintas distancias del imán, pero siempre estrictamente sobre el eje que pasa por su centro (así $\rho = 0$), establecimos que la reflexión del haz fino del láser en el centro del imán viajara de regreso a la fuente en la misma trayectoria de ida. Luego medíamos siempre con la sonda del teslámetro sobre esta línea a diferentes distancias z . Estos detalles aparecen en la figura 2. Con los datos obtenidos usando Excel construimos la gráfica de z^3 contra $1/B$ y la ajustamos por el método de mínimos cuadrados para obtener la ecuación de ajuste y sus parámetros.

El procedimiento del segundo método aparece en varios reportes de la literatura (Cedrina y Villar, 1997; Fuentes, 2011; Hernández y Espinosa, 2018) y consiste en determinar el período de las oscilaciones pequeñas del imán para diferentes valores, el campo magnético resultante de la componente horizontal del campo magnético terrestre y el generado por una bobina solenoide recta cuando por ella circula una corriente dada i . En la figura 3 se muestra un esquema de este montaje. Graficando la dependencia de ω^2 contra i , y ajustándola, se puede obtener la razón giro magnética y de ella el momento magnético del imán.



Figura 1. Montaje experimental para determinar el momento magnético del imán a través de su relación con la magnitud del campo que genera.



Figura 2. Detalles del montaje para garantizar las mediciones del campo magnético sobre el eje que pasa por el centro del imán.

El período de las oscilaciones se obtuvo a partir del tiempo medido con un cronómetro de precisión 0,1 s en que el imán ejecutaba 20 oscilaciones contadas con un contador acoplado a la fotoc compuerta mostrada en la figura 3.

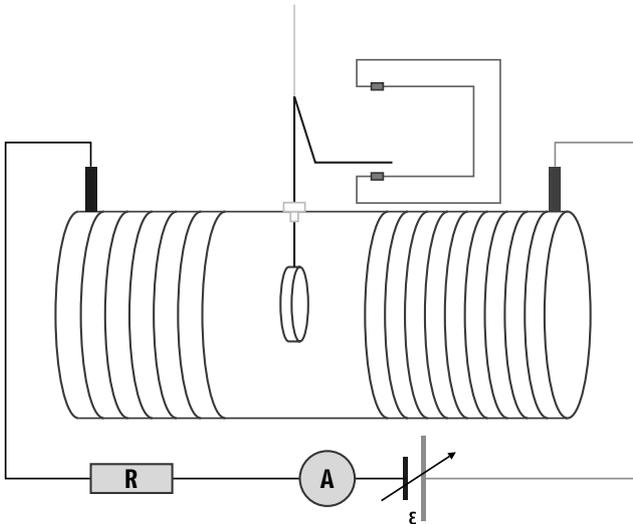


Figura 3. Esquema del montaje experimental para determinar el periodo de oscilaciones pequeñas de un imán en el interior de una bobina solenoide recta al variar la corriente que circula por esta.

Resultados y discusión

En la figura 4 se muestra la gráfica que representa la dependencia de z^3 contra $1/Bz$ que resulta lineal y su ecuación de ajuste, de la cual obtuvimos el valor de la pendiente 1.10^{-7} .

Con este valor y usando la ecuación $z^3 = \frac{2\mu_0\mu}{4\pi B}$ derivada de la (5) determinamos el valor de μ que resultó $0,5 \text{ A}\cdot\text{m}^2$.

En la figura 5 aparece la gráfica que representa la dependencia del cuadrado de la frecuencia angular del valor de la corriente que circula por la bobina solenoide que resulta lineal y su ecuación de ajuste, de la cual obtuvimos el valor de la pendiente y del intercepto con el eje de las ordenadas. A partir de los datos que aparecen en la tabla 1 se hicieron los cálculos del momento de inercia del imán I , la constante del solenoide K_{sol} y del momento magnético del imán de acuerdo con la ecuación (7).

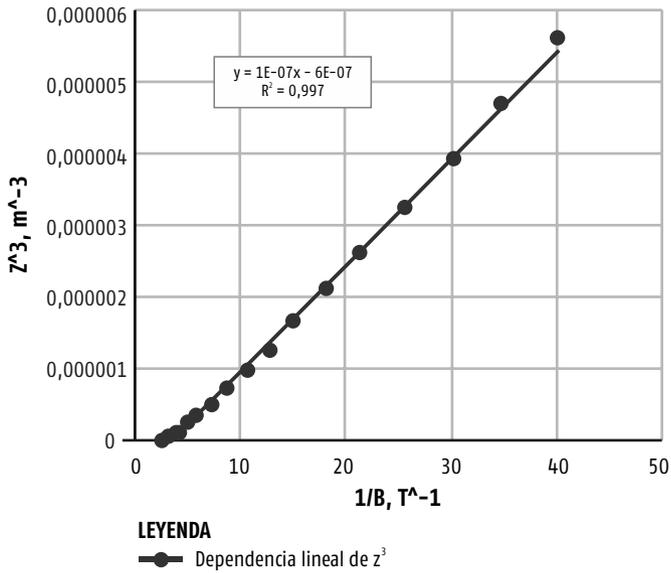


Figura 4. Gráfica de la dependencia lineal de z^3 con el inverso del campo magnético con su ecuación de ajuste.

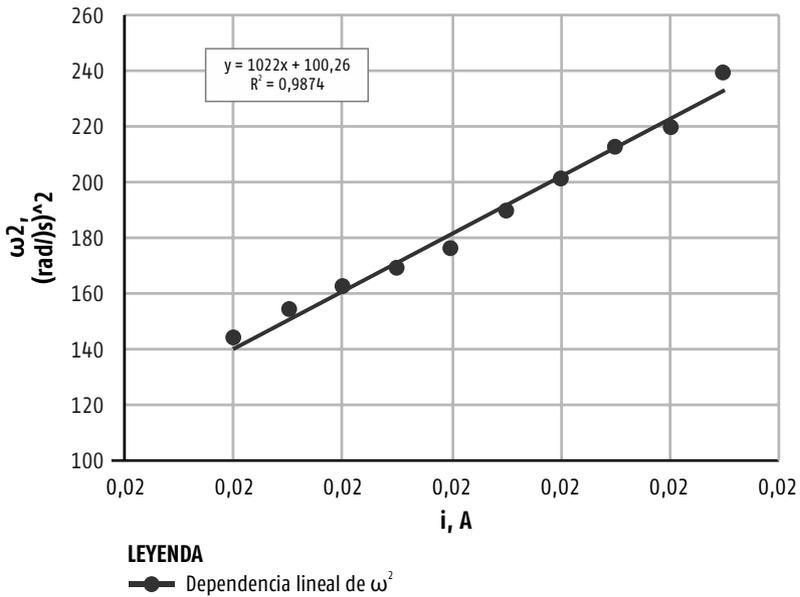


Figura 5. Gráfica de la dependencia lineal de ω^2 con la corriente por el solenoide i con su ecuación de ajuste.

Tabla 1. Parámetros del montaje y cálculo del momento de inercia y la constante del solenoide

IMÁN		BOBINA SOLENOIDE	
Masa	8,4 g	Número de vueltas	54
Longitud	5,50 mm	Longitud	26,6 cm
Radio	7,00 mm	Radio	10 cm
Momento de inercia	$1,24 \times 10^{-7}$ kg m ²	Constante del solenoide	$25,49 \times 10^{-5}$ T/A
$I = \frac{MR^2}{4} + \frac{ML^2}{12}$		$K_{sol} = \mu_0 \frac{N}{L}$	

Los cálculos efectuados dieron como resultado un valor para μ de 0,497 A.m².

En la tabla 2 se brinda un resumen de los resultados obtenidos para el momento dipolar magnético del imán por los dos métodos empleados y sus incertidumbres estimadas.

Tabla 2. Valores del momento magnético del imán por diferentes métodos

MÉTODO	MOMENTO MAGNÉTICO	INCERTIDUMBRE
CAMPO GENERADO POR EL IMÁN	0,50	0,08
OSCILACIONES DEL IMÁN EN CAMPO MAGNÉTICO	0,497	0,021

Como se puede apreciar, los resultados obtenidos por los dos métodos resultan muy similares y cercanos a 0,5 A.m². Este valor resulta relativamente alto y para tener una idea de ello basta considerar que una espira de corriente con igual área que la de nuestro imán ($1,54 \times 10^{-4}$ m²) debía conducir una corriente de 3 248 A para tener el mismo momento magnético. Este valor está en correspondencia con la intensidad del campo magnético generado por nuestro imán, cercano a 0,4 T en su superficie, y que corresponde con el de un imán permanente de una aleación de neodimio, hierro y boro (Nd₂Fe₁₄B) de las dimensiones del nuestro.

Conclusiones

Los dos métodos empleados para la determinación experimental del momento dipolar magnético de un imán permanente resultan adecuados. El valor obtenido por los dos métodos prácticamente coincide y es de 0,5 A.m².

Bibliografía

- CEDRINA, L. y P. VILLAR (1997): «Oscilación de un dipolo magnético en un campo magnético uniforme», Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires <https://www.fisicarecreativa.com/informes/.../iman_oscil_villar.pdf> [12/12/2018].
- FUENTES, W. (2011): «Momento magnético de un Imán. Ley de Faraday y momento de torsión», Escuela de Física, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de Honduras, <<https://docplayer.es/20805866-Momento-magnetico-de-un-iman.html>> [12/12/2018].
- HERNÁNDEZ, A. y O. ESPINOSA: (2018): «Evaluación de dos montajes de bajo costo para la determinación de la componente horizontal del campo magnético terrestre», en *V Taller de Enseñanza de la Física, CD-ROM*, Santiago de Cuba. ISBN 978-959-207-618-1.



Evaluación de dos montajes de bajo costo para la determinación de la componente horizontal del campo magnético terrestre

ARCELIO A. HERNÁNDEZ FERREIRA,* OTHMAN ESPINOSA
VALDÉS*

Introducción

La tradición en la enseñanza de Física ha sido trabajar en laboratorios especialmente equipados con experimentos ya estandarizados y utilizar aparatos especiales adquiridos de ciertos proveedores de equipos de laboratorio. Desafortunadamente, muchos sistemas experimentales existentes en el mercado son complejos y muy costosos, por lo que no todas las instituciones tienen los fondos para proporcionar a cada alumno la oportunidad satisfactoria de experimentar con estos equipos. Por otra parte, se suele creer que los estudiantes, para hacer experimentos, necesitan trabajar con ese equipo especial y costoso en los laboratorios. Esto también lleva a la percepción de que los experimentos de laboratorio de bajo costo son inferiores y no pueden considerarse genuinos.

La falta de recursos en los países en desarrollo obstaculiza los avances en la educación científica, en especial en Física. Esta es una motivación adicional en nuestro esfuerzo para resolver el problema mediante el diseño y la construcción de experimentos «de bajo costo». El término «equipo de bajo costo» se ha asumido en la literatura científica y se publican centenares de artículos dedicados a ilustrar cómo verificar leyes, fenómenos, etc. con el uso de variantes alternativas a los tradicionales y costosos equipos de laboratorio ofertados por las firmas comercializadoras (Wolfe, 2003; Kagan, 2011; Öztürk, 2012; Vollmer y Möllmann, 2012).

* Departamento de Física, Facultad de Ingeniería, Universidad de Cienfuegos, Cuba.

Creemos que, con buena imaginación e investigación adecuada, se pueden diseñar muchos experimentos de física de alta calidad, no solo para los cursos de Introducción a la Física, sino incluso para los cursos de Física General de las carreras universitarias. Estos pueden ser realizados por los estudiantes en los laboratorios utilizando materiales y dispositivos de bajo costo. En este trabajo ilustraremos lo anterior con dos ejemplos relativos a la medición de la componente horizontal del campo magnético terrestre local, cuya magnitud de solo decenas de μT se presenta como un reto de alta complejidad.

1. Materiales y métodos

El primer montaje se muestra esquemáticamente en la figura 1. En este se usa la interacción de la aguja de una brújula con el campo magnético horizontal resultante del campo magnético terrestre y el campo generado al circular corriente eléctrica por algunas bobinas, cuyo valor puede calcularse mediante la aplicación de la ley de Biot-Savart.

Se empleó una brújula simple de laboratorio con escala graduada cada 5 grados, dos bobinas (una circular y otra cuadrada), una fuente de suministro DC y un amperímetro analógico clase 0,25 con exactitud 0,01 A.

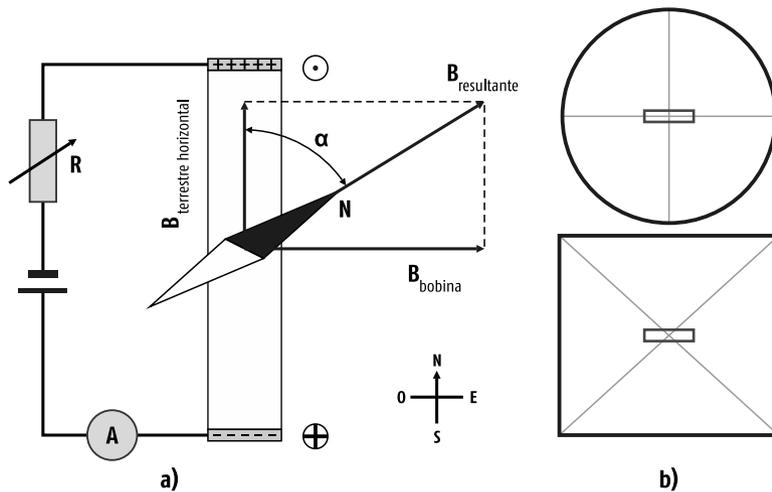


Figura 1. a. Esquema del primer montaje empleado. b. Posiciones de la brújula en el interior de las bobinas.

En la tabla 1 aparecen las características de las bobinas empleadas y las expresiones para el cálculo del campo magnético generado por ellas al

circular una corriente de intensidad i . Estas son fácilmente deducibles usando la ley de Biot-Savart.

Tabla 1. Características de las bobinas empleadas y expresiones para el cálculo del campo magnético generado por ellas al circular una corriente de intensidad i

TIPO DE BOBINA	DIMENSIONES	EXPRESIÓN PARA CALCULAR B
CIRCULAR	R = 75 mm, N = 320	$B = \frac{\mu_0 Ni}{2R}$
CUADRADA	L = 136 mm , N = 3	$B = \frac{2\sqrt{2}\mu_0 Ni}{\pi L}$

La aguja de la brújula se orienta en la dirección correspondiente al campo magnético horizontal resultante, que es:

$$\vec{B}_{resultante} = \vec{B}_{horizontal\ terrestre} + \vec{B}_{bobina} \tag{1}$$

y cuya dirección forma un ángulo α con la dirección de la componente horizontal del campo magnético terrestre. Es fácil ver que: $\tan \alpha = B_{bobina}/B_{horizontal\ terrestre}$, de donde:

$$B_{bobina} = B_{horizontal\ terrestre} * \tan \alpha \tag{2}$$

Mediante la circulación de una corriente de intensidad i (que medimos con el amperímetro) generamos un campo magnético en la bobina que produce una desviación de la aguja de la brújula un cierto ángulo α , que también medimos. Podemos calcular la tangente de los ángulos α y con el valor de la intensidad de la corriente medida podemos calcular la magnitud del campo magnético generado por la bobina haciendo uso de las expresiones antes mencionadas. Con estos pares de valores y empleando Excel de Microsoft construimos la gráfica de B_{bobina} contra $\tan \alpha$, que exhibe una dependencia lineal, y la ajustamos usando el método de mínimos cuadrados.

El segundo montaje se muestra esquemáticamente en la figura 2. Este consta de una bobina solenoidal en cuyo centro se coloca un imán permanente suspendido de un hilo muy largo, que prácticamente no ejerce momento torsor restaurador al girar ángulos pequeños. Este imán interactúa, en virtud de su momento dipolar magnético, con el campo magnético resultante del solenoide y de

la componente horizontal del campo magnético terrestre y ejecuta oscilaciones armónicas que se registran con una fotocelda. El período de estas oscilaciones se determina con ayuda de un contador de ciclos y un cronómetro analógico con exactitud 0,1 s. Se midió el tiempo en que el imán efectuaba 20 oscilaciones. Para el suministro de corriente a la bobina solenoidal se empleó una fuente de suministro DC y su intensidad se midió con un amperímetro analógico clase 0,25 y exactitud 0,01 A.

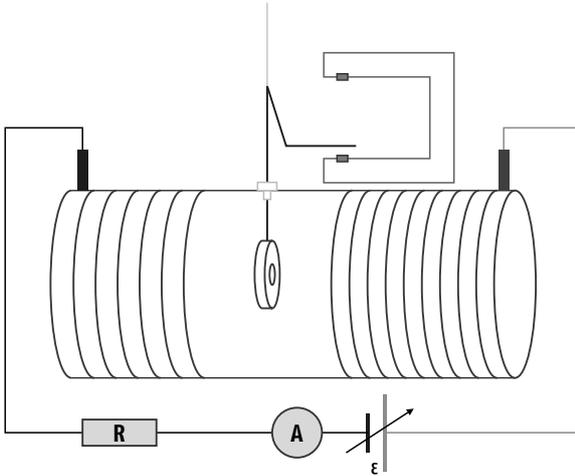


Figura 2. Esquema del segundo montaje empleado.

El único torque presente es el debido a la interacción del momento dipolar magnético del imán con el campo resultante. Considerando pequeñas desviaciones angulares respecto a la posición de equilibrio, la ecuación fundamental de la dinámica de la rotación se puede escribir de la siguiente forma:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{mB_{res}}{I} \theta \Rightarrow \frac{d^2\theta}{dt^2} = \omega^2 \theta \Rightarrow \omega^2 = \frac{m}{I} B_{res} \quad (3)$$

Donde m es el momento dipolar magnético del imán e I el momento de inercia de este respecto al eje de giro:

$$\omega^2 = \frac{m}{I} B_{bobina} + \frac{m}{I} B_{hor. terr.} \quad (4)$$

El campo de una bobina solenoidal se puede calcular aplicando la ley de Ampere en la forma:

$$B_{bobina} = \mu_0 \frac{N}{L} i = K_{bobina} i \quad (5)$$

y sustituyendo (5) en la ecuación (4) tenemos la ecuación de trabajo:

$$\omega^2 = \frac{m}{I} K_{bobina} i + \frac{m}{I} B_{hor. terr.} \quad (6)$$

Así, el cuadrado de la frecuencia angular de las oscilaciones del imán en el campo magnético resultante satisface una dependencia lineal respecto a la corriente que genera el campo magnético en la bobina solenoidal. En esta relación la pendiente es el producto de la razón giro magnética del imán $\frac{m}{I}$ por el parámetro K_{bobina} dado por las características de la bobina (N/L) multiplicado por μ_0 , cuyo cálculo es simple.

Con los pares de valores de $\omega^2 = \frac{4\pi^2}{T^2}$ y los correspondientes valores de i se empleó Excel para construir la gráfica de ω^2 contra i , se ajustó por el método de los mínimos cuadrados que proporcionó la ecuación de donde se obtuvieron la pendiente, el intercepto y el valor de R^2 . Con el valor de la pendiente y K_{bobina} se pudo obtener $\frac{m}{I}$ y con este y el intercepto $B_{hor. terr.}$, que era nuestro propósito.

Con el objetivo de contrastar los resultados obtenidos se empleó el *software* WMM 2015 (World Magnetic Model, versión del 2015) descargado desde el sitio web del National Geophysical Data Centre de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) para el cálculo de la magnitud del campo magnético terrestre local y sus componentes.

2. Resultados y discusión

En la figura 3 se muestra la gráfica de B_{bobina} contra $\tan \alpha$ correspondientes al primer montaje para las dos bobinas, las cuales exhiben un comportamiento lineal con un valor de R^2 muy próximo a la unidad (0,9953 para la bobina circular y 0,9989 para la cuadrada), y también aparecen sus ecuaciones de ajuste. Los valores de sus pendientes corresponden precisamente al valor de la componente horizontal del campo magnético terrestre, que resultaron ser igual a 21,17 μT para la bobina circular con 320 vueltas y de 24,48 μT para la cuadrada con 3 vueltas.

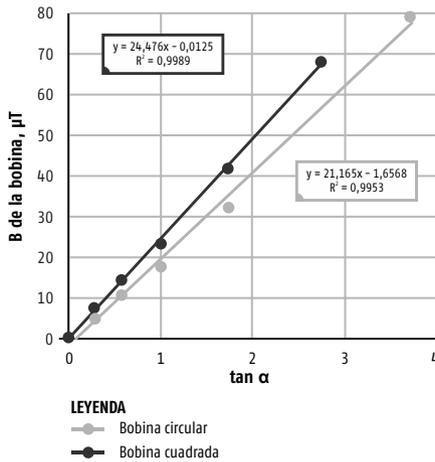


Figura 3. Gráfica del campo magnético generado por la bobina contra la tangente del ángulo de desviación de la aguja de la brújula.

La ejecución del *software* WMM en su versión del año 2015 para la longitud y latitud de Cienfuegos al nivel del mar (elevación 0 m) brindó los resultados que se muestran en la tabla 2. Como se puede observar, el valor de la componente horizontal del campo magnético terrestre local es de $26,090 \pm 0,133$ mT. Este valor se puede usar como referencia para comparar con nuestros resultados.

En el año 2012 se ejecutó otro *software* de la misma institución, conocido como IRGF 11 para Cienfuegos; en la tabla 3 se muestran sus resultados, que son compatibles con los del presente año, teniendo en cuenta la reducción por año.

Tabla 2. Reporte de salida de la ejecución del *software* WMM 2015 para Cienfuegos

MAGNETIC MODEL: WMM2015				PLACE: CIENFUEGOS			
Latitude: 22,140 degrees		Longitude: -80,440 degrees		Elevation: 0 meters			
Date in YY-MM-DD format	Declination in GMS coordinates	Inclination in GMS coordinates	Horizontal Intensity in nT	Component East in nT	Component North in nT	Component Vertical in nT	Total Field in nT
2018/05/17	-5 Deg -60 min (WEST) +/- 19 min	51 Deg -4 min (DOWN) +/- 13 min	26 090,2 +/- 133,0	-2 725,0 +/- 89,0	25 947,5 +/- 138,0	32 299,1 +/- 165,0	41 520,2 +/- 152,0

Tabla 2. Reporte de salida de la ejecución del *software* WMM 2015 para Cienfuegos (cont.)

MAGNETIC MODEL: WMM2015				PLACE: CIENFUEGOS			
Latitude: 22,140 degrees		Longitude: -80,440 degrees		Elevation: 0 meters			
Date in YY-MM-DD format	Declination in GMS coordinates	Inclination in GMS coordinates	Horizontal Intensity in nT	East Component in nT	North Component in nT	Vertical Component in nT	Total Field in nT
Change per year	-6,8 min/yr	-6,3 min/yr	-11,3 nT/yr	-49,8 nT/yr	-16,6 nT/yr	-135,8 nT/yr	-112,7 nT/yr

Tabla 3. Reporte de salida de la ejecución del *software* IRGF 11 para Cienfuegos

MODEL: IRGF11				PLACE: CIENFUEGOS			
Latitude: 22,140 degrees		Longitude: -80,440 degrees		Elevation: 0 meters			
Date in YY-MM-DD format	Declination in decimal degrees	Inclination in decimal degrees	Horizontal Intensity in nT	East Component in nT	North Component in nT	Vertical Component in nT	Total Field in nT
2011/12/10	-5,327	51,682	26 177, 3	-2 430,2	26 064,2	33 124,8	42 219,7
2012/12/10	-5,433	51,57	26 163,1	-2 477	26 045,6	32 974,2	42 092,8
Change per year	-0,106	-0,113	-14	-46,8	-18,6	-150,6	-126,6

Tomando el valor de 26,09 μ T como referencia, las incertidumbres relativas cometidas son de 18,9 % para la bobina circular y de 6,2 % para la bobina cuadrada, lo que se considera muy satisfactorio.

Una causa de estas diferencias se encuentra en el cálculo de las magnitudes del campo magnético generado por las espiras donde se emplearon expresiones obtenidas de la ley de Biot-Savart. Las expresiones teóricas se obtienen de multiplicar por N (el número de espiras) la magnitud obtenida para una espira. Esta condición se cumple mejor en el caso de la bobina cuadrada de solo 3 espiras de alambre fino, las cuales casi coinciden. En la bobina circular de 320 espiras, construida con varias capas de alambre, no todas tienen el mismo radio, ni el centro de la espira se encuentra a igual distancia de todas. Por otra parte, la localización de la aguja de la brújula en el plano de la bobina se logra mejor en la cuadrada, que no tiene prácticamente espesor, que en la circular, cuyo espesor es de algo más de 1 cm.

En la figura 4 se muestra la gráfica del cuadrado de la frecuencia angular de las oscilaciones del imán permanente ω^2 contra la intensidad de la corriente i que circula por la bobina solenoidal generada por genera el campo magnético. Esta exhibe un comportamiento lineal casi perfecto con valor de $R^2 = 0,9996$. Allí aparece la ecuación de ajuste determinada por el método de los mínimos cuadrados.

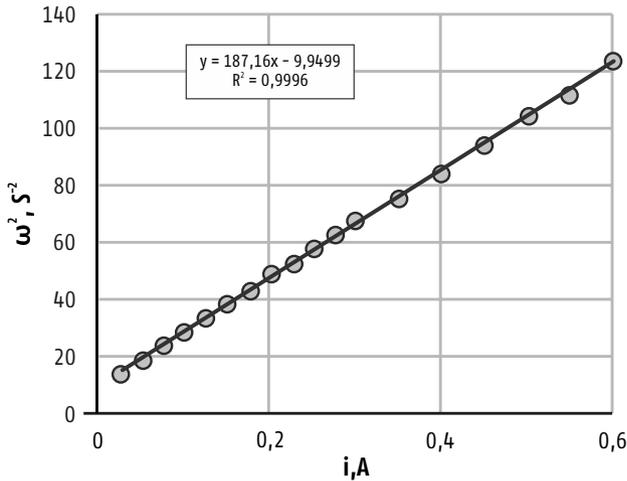


Figura 4. Gráfica del cuadrado de la frecuencia angular contra la intensidad de la corriente.

Dividiendo el valor de la pendiente (187,16) entre K_{bobina} , cuyo valor es $50,265 \times 10^{-5} \text{ T/A}$, si tenemos en cuenta que $N = 108$ espiras y $L = 270 \times 10^{-3} \text{ m}$ obtenemos el valor de la constante giro magnética $\frac{m}{I}$ que resulta ser $372\,342,99$. Si dividimos el valor del intercepto (9,9499) por el de $\frac{m}{I}$ obtenemos la magnitud de la componente horizontal del campo magnético terrestre, que resulta ser $26,72 \mu\text{T}$. Si empleamos el valor de $26,09 \mu\text{T}$ como referencia para la magnitud de la componente horizontal del campo magnético terrestre, entonces la incertidumbre relativa cometida en este segundo montaje es $2,4 \%$, lo que resulta también muy satisfactorio.

Conclusiones

Los dos montajes propuestos resultan relativamente fáciles de reproducir y se enmarcan en la concepción de equipos de bajo costo.

A pesar de su simplicidad, permiten determinar la magnitud de la componente horizontal del campo magnético terrestre con una incertidumbre relativa baja.

El uso del *software* WMM 2015 brinda la posibilidad de verificar el resultado obtenido, pues confirma si el valor es adecuado o no y también la justeza de emplear la ley de Biot-Savart para el cálculo de la magnitud del campo magnético generado por las bobinas.

Ambos montajes podrían ser incluidos como ejercicios de una práctica de laboratorio que tuviera como objetivo determinar la componente horizontal del campo magnético terrestre.

Bibliografía

- KAGAN, D. (2011): «An Inexpensive Mechanical Model for Projectile Motion», *The Physics Teacher*, vol. 49, n.º 5, p. 265.
- ÖZTÜRK, Y. (2012): «Simple and Low Cost Polarimeter System», *European Journal of Physics Education*, vol. 3, issue 1, pp. 23-29.
- VOLLMER, M. y K. P. MÖLLMANN (2012): «Low Cost Hands-on Experiments for Physics Teaching», *Latin- American Journal of Physics and Education*, vol. 6, suppl. I, August, pp. 3-9.
- WOLFE, J. (2003): «Interesting and Inexpensive Experiments for High School Physics», Faculty of Sciences, School of Physics, Sydney, <<http://www.phys.unsw.edu.au/hsc>> [12/8/2018].



La evolución de los instrumentos de medición de las magnitudes físicas y su influencia en la modalidad y resultados de las prácticas de laboratorio de Física. Caso del péndulo simple

ARCELIO HERNÁNDEZ FERREIRA,* ZÓSIMO ARÉVALO VELOSA,**
GILBERTO PÉREZ ROQUE*

Introducción

Las mediciones de las magnitudes físicas han ido evolucionando con el desarrollo tecnológico de sus instrumentos de medición. Como consecuencia de este desarrollo tecnológico ha ocurrido un cambio sustancial en el propio proceso de medición. Este proceso ha evolucionado entre dos casos extremos: uno, caracterizado por una interacción directa del instrumento de medición con el sistema físico que exhibe la magnitud que se desea medir, pero mediada de forma directa por la observación del hombre que lee el resultado de dicha interacción; en el otro la interacción ocurre entre el sistema físico y un sensor que reacciona de forma conocida en dependencia del valor de la magnitud física de interés y transfiere una señal de salida que es acondicionada para su envío a una computadora donde, por regla general, se registra y puede ser procesada mediante un *software* diseñado para tales fines, que proporciona una salida en los términos más convenientes. En este proceso el protagonismo del hombre en el proceso de medición se ha reducido.

Se pueden identificar al menos tres etapas asociadas con la evolución tecnológica de los instrumentos de medición:

- Etapa de los instrumentos analógicos con indicadores de aguja, varias escalas con sensibilidades distintas, impedancias de entrada no siempre altas y clases de acuerdo con su calidad, etc.

* Departamento de Física, Facultad de Ingeniería, Universidad de Cienfuegos, Cuba.

** Centro Avanzado de Tecnología-High Technology Center (CAT-HTC), Ibagué, Colombia.

- Etapa de los instrumentos digitales, que en gran parte resolvieron el problema de la impedancia de entrada y la estimación en las mediciones. Algunos aún conservan las escalas múltiples, pero la precisión de cada una se autoestablece. Los más recientes se hacen autoajustables, pueden almacenar las mediciones y pueden realizar algún procesamiento matemático con ellas.
- Etapa del uso de los sensores. El desarrollo de nuevos materiales y el proceso de miniaturización ha hecho posible la creación de sensores o transductores capaces de brindar a su salida una señal, generalmente eléctrica, proporcional al valor de la magnitud física que exhibe un sistema físico con el que interacciona y que se desea medir. Al mismo tiempo se desarrollaron las interfaces que se acondicionaban de estas señales para su envío a la computadora y los *softwares* para la adquisición y procesamiento de los datos adquiridos de los sensores.

Las características de las prácticas de laboratorio de Física han respondido, en su organización y desarrollo, a cada una de estas etapas, y su estructura didáctica estaba concebida en función de ello.

En la etapa en que se empleaban instrumentos de medición analógicos se prefería que estos fueran de clase 0,25 o inferior y se tenía que observar de forma rigurosa su sensibilidad cuando se cambiaba de una escala a la otra por necesidad de la medición. Los instrumentos poseían espejos detrás de las escalas para evitar el error de paralaje y se hacían estimaciones de valores para posiciones intermedias a las divisiones establecidas de las agujas indicadoras. Por lo general, se efectuaba un número alto de mediciones y ello requería de tiempo. El tratamiento estadístico se hacía de manera manual, al inicio con el empleo de reglas de cálculo y luego usando calculadoras, que también fueron aumentando sus prestaciones.

Como el proceso de efectuar las mediciones tomaba bastante tiempo, el horario de las prácticas de laboratorio se empleaba fundamentalmente para:

- Verificar la preparación del estudiante con algunas preguntas de entrada.
- Realizar el montaje del puesto o su comprobación (si este era complejo o sin alternativas).

- Efectuar las mediciones para recolectar los valores experimentales.
- Revisar los valores de las mediciones y, por la experiencia del profesor, saber si eran adecuados o no.

Todo el procesamiento de estos datos se realizaba por los estudiantes fuera del laboratorio y luego, con base en estos, se redactaba el informe final con las correspondientes conclusiones. Finalmente, en otra sesión, se discutía el informe de la práctica que debía contener todos estos elementos.

Con la llegada de los instrumentos de medición digitales el proceso de medición se simplificó en cierta medida, se eliminó el proceso de apreciación en las mediciones y se elevaron la exactitud y precisión de estas respecto a los instrumentos analógicos.

Mientras no se introdujo la computación los cálculos continuaban haciéndose con calculadoras y siguiendo pautas similares a las de la etapa precedente. Tras el arribo de las computadoras se inició el procesamiento de las mediciones con el empleo de *software* con elementos de estadística o especializados en ello.

Cabe señalar que, en esta etapa, algunos fabricantes de equipos de medición digitales (como HP, desde los años 1970) desarrollaron protocolos de comunicación de sus equipos con una computadora, para realizar operaciones de «comando» de los equipos de prueba y «lectura» de los resultados obtenidos. Estos protocolos son conocidos, en la actualidad, como IEEE-488.1 e IEEE 488.2. La International Electrotechnical Commission (IEC) desarrolló su estándar (IEC 625), que se combinó con el IEEE en la parte de Codes, Formats, Protocols and Common Commands (IEC 60488). National Instruments (NI), fabricante de Labview, introdujo una extensión compatible con el IEEE 488.1, llamado HS-488. No obstante, los comandos para instrumentos específicos variaban entre fabricantes e incluso entre modelos. Para estandarizar esto, en los años noventa se introdujo el Standard Commands for Programmable Instruments SCPI «Standard Commands for Programmable Instruments (SCPI) Volume 1: Syntax and Style», 1999. El SCPI tuvo como predecesor el Text Markup Language (TML) de HP de 1989 y fue creado originalmente para el IEEE 488.1, pero puede usarse con RS-232, RS-422, Etherhet, USB, VXIbus, HiSLIP y otros (ICS Electronics, s. f.). Hasta la fecha, osciloscopios Tektronix cuentan con GPIB (Tektronik, s. f.) y se

pueden adquirir módulos de interfaz para estos equipos. Prologic, LLC Intelligent Embedded Devices, vende adaptadores GPIB a LAN y a USB para convertir cualquier PC en un controlador GPIB (HP-IB). El GPIB utiliza el conector Amphenol micro ribbon de 24 pines.

Para la mayoría de los estudiantes no hubo un cambio sustancial en la forma de desarrollar las prácticas porque, como regla general, aunque se redujo la duración de estas, no siempre podían concluir las mediciones y hacer el procesamiento de los datos en la PC del laboratorio para mostrar sus resultados al profesor. Esto era posible solo en algunos casos. La elaboración del informe se hacía fuera del laboratorio y quedaba pendiente su discusión.

La introducción de los sistemas de prácticas de laboratorios asistidos por computadoras propició una significativa simplificación de todo el proceso de realización de las mediciones y su procesamiento, y por lo general ha aumentado la exactitud y precisión de las mediciones.

En los sistemas asistidos por computadoras los sensores de medición se intercalan en los montajes experimentales para efectuar las mediciones de las magnitudes físicas necesarias, se conectan a la computadora a través de una interfaz que realiza la adecuación de la señal proveniente del sensor. Finalmente, se ejecuta un programa en la computadora que guía el proceso de efectuar las mediciones, las procesa y presenta los resultados en la forma conveniente. Todo esto está integrado en el sistema.

Sin embargo, en la mayoría de los casos las prácticas de laboratorio no han modificado su estructura de acuerdo con las nuevas condiciones. Como resultado de ello lo que se ha conseguido es acomodar a los estudiantes, quienes siguen una rutina de pasos (a lo que se ha reducido el proceso de medición) y cuando analizan los resultados llegan a las mismas conclusiones que cuando la práctica se hacía de forma más manual. Además, reiteran los mismos niveles de conocimiento que en el nivel de enseñanza anterior. No hay una ganancia en el razonamiento; no se aprovechan las ventajas del aumento de la exactitud y la precisión de las mediciones, de su proceso de simplificación con menor intervención del hombre, con menos margen para las fuentes de errores y del procesamiento de los datos con los *software* asociados, para ir más allá. Desde nuestro punto de vista, las prácticas de laboratorio asistidas por computadoras deben modificar las habilidades a desarrollar. A diferencia de las prácticas convencionales, ahora el énfasis ya no está

sobre las habilidades experimentales y la manipulación de instrumentos de medición (casi inexistente), sino que es preciso desarrollar otras habilidades intelectuales como el análisis, la inducción, la generalización, la síntesis, al enfrentar al estudiante a un conjunto de mediciones procesadas (obtenidas de forma muy fácil) bajo diferentes condiciones, modificando algún parámetro experimental. Él tendrá que observar regularidades, tendencias, intuir cuál es la influencia de la variación de dicho parámetro, extraer conclusiones.

Tomemos como referencia la práctica de laboratorio relativa al movimiento armónico simple ejecutado por el péndulo simple. Para este sistema la condición armónica se logra en ausencia de fricción y con oscilaciones pequeñas. Bajo estas suposiciones el período de las oscilaciones solo depende de la raíz cuadrada de la longitud del péndulo y la amplitud de estas se mantiene en el tiempo. En la literatura hay más reportes sobre cómo considerar oscilaciones no pequeñas (Kidd y Fogg, 2002; Amrani, Paradis y Beaudin, 2008; Amore *et al.*, 2011; Salinas-Hernández *et al.*, 2017) que sobre cómo tener en cuenta los efectos de la fricción. Desde el nivel medio siempre se reitera la verificación de la misma relación y el trabajo de laboratorio con las condiciones del uso del HPCI-1 es muy sencillo y poco aporta de nuevo al estudiante.

Los objetivos del presente trabajo en que se utiliza el péndulo simple como caso de estudio son:

- Ilustrar la ganancia en exactitud y precisión de los resultados obtenidos para los valores de la aceleración gravitatoria local como consecuencia del uso de instrumentos de medición más exactos.
- Mostrar un posible diseño para la práctica de laboratorio del estudio del péndulo simple que permita aprovechar las potencialidades de los sistemas asistidos por computadoras para desarrollar otras habilidades intelectuales en los estudiantes y profundizar en el conocimiento del fenómeno objeto de estudio a un nivel superior.

1. Materiales y métodos

Se empleó el montaje con los accesorios del trabajo de laboratorio 14 de la sección de Mecánica titulado «Midiendo la aceleración gravitatoria con el péndulo», que aparece el sistema de prácticas de laboratorio de Física asistido por computadora HPCI-1, de la firma Star Sensor Ltd. (HPCI-1 Computer Aided Physics Laboratory.

Experiment Manual. Version 4.0. U-Star Sensor Technology Co., Ltd; HPCI-1 Computer Aided Physics Laboratory. Application Manual. Version 4.0. U-Star Sensor Technology Co., Ltd.). En la figura 1 aparece un esquema de este montaje y el soporte donde se coloca el péndulo.

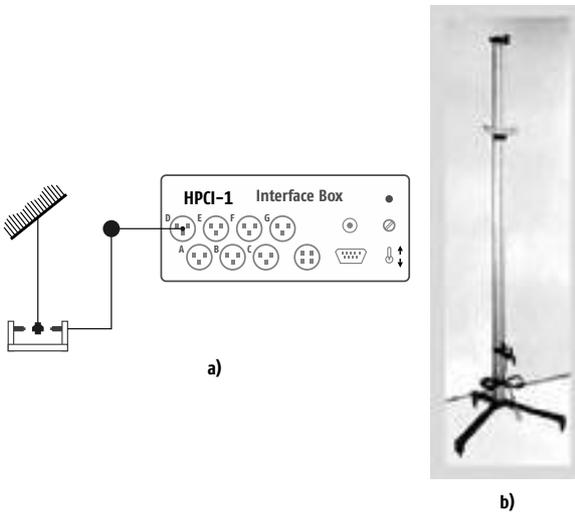


Figura 1. a. Esquema del montaje. b. Soporte para colocar los péndulos.

El soporte tenía la posibilidad de nivelación con tres tornillos en sus patas para garantizar el movimiento de oscilación del cuerpo en un plano. Variando la distancia desde donde se colgaba el péndulo se obtenían diferentes valores de su longitud. La esfera oscilaba siempre a la misma altura y en el centro entre el emisor y el receptor de una fotoc compuerta tipo B. Ejecutando el *software* asociado con este trabajo se pudieron obtener los valores del período de 10 oscilaciones para 6 longitudes distintas del péndulo, sus promedios y la gráfica de ajuste del ploteo de los promedios del período al cuadrado contra las longitudes del péndulo. La exactitud en las mediciones de tiempo con la interfaz era de 0,001 s.

Para el primer objetivo se empleó una esfera de acero y para cada una de las longitudes del péndulo también se llevaron a cabo las mediciones del tiempo de 10 oscilaciones, empleando un cro-

nómetro analógico con exactitud 0,1 s y uno digital con exactitud 0,01 s. En este caso el procesamiento se realizó empleando Excel de Microsoft.

Para el caso armónico se obtiene que la frecuencia angular del péndulo viene dada por :

$$\omega^2 = \frac{4\pi^2}{T^2} = \frac{g}{L} \Rightarrow L = \frac{1}{\omega^2} g \quad \text{o} \quad T^2 = \frac{4\pi^2}{g} L \quad (1)$$

El *software* del sistema HPCI-1 asociado con este trabajo construye y ajusta la gráfica de T^2 contra L , y brinda el valor de la pendiente que corresponde al cociente de $(4\pi^2)/g$. Es preferible construir las gráficas de L contra el inverso de ω^2 , de forma que las pendientes de estas relaciones lineales nos brinden directamente el valor de la aceleración gravitatoria g . Las gráficas se ajustaron por el método de los mínimos cuadrados, se obtuvieron las ecuaciones de las rectas de ajuste (de ellas los valores de la pendiente y el intercepto) y el parámetro R^2 , que nos indicaba el grado de linealidad.

En el segundo objetivo se planteó obtener los resultados usando solo la interfaz, como en el caso anterior, para 10 oscilaciones y 6 longitudes, aunque utilizando tres péndulos con esferas de igual diámetro (19 mm), pero que diferían en sus masas porque estaban hechas de materiales diferentes, a saber, acero (26,9 g), aluminio (9,8 g) y madera (2,4 g). El procesamiento se haría de forma similar para comparar los resultados, tomando como base los valores obtenidos para la aceleración gravitatoria.

Para el cálculo del valor de la aceleración gravitatoria local para la latitud λ de la ciudad de Cienfuegos al nivel del mar se empleó la ecuación recomendada por la Organización Internacional de Metrología Legal en el boletín OIML 127 (Thulin, 1992) con una exactitud del 0,01 %. Esta ecuación utiliza los coeficientes adoptados por la Asociación Internacional de Geodesia (AIG) en el GRS80 (Geodetic Referencial System of 1980) (Moritz, 1988):

$$g = 9,780318 * (1 + 0,0053024 \sin^2 \lambda - 0,0000059 \sin^2 2\lambda) \text{ m/s}^2 \quad (2)$$

2. Resultados y discusión

En las figuras 2 y 3 se presentan los resultados obtenidos vinculados con el primer objetivo.

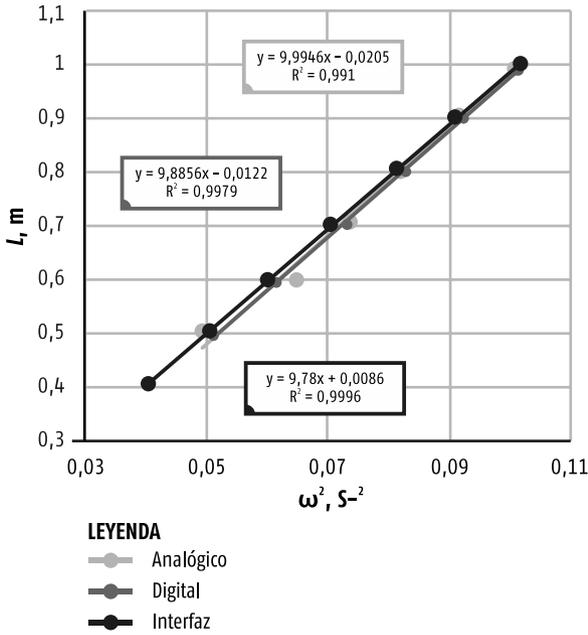


Figura 2. Gráfica de L contra el inverso de ω^2 realizada con tres instrumentos de diferentes exactitudes.

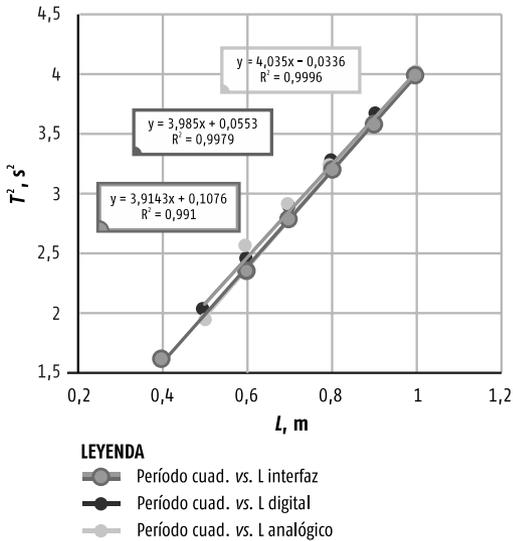


Figura 3. Gráfica de T^2 contra L realizada con tres instrumentos de diferentes exactitudes.

Como se puede observar, al procesar los datos obtenidos para el período del péndulo, tanto en la forma que lo presenta el sistema HPCI-1 (figura 3), como en la adoptada por nosotros (figura 2), los valores obtenidos para la aceleración gravitatoria resultan mucho más fidedignos cuando se emplearon instrumentos de mayor exactitud.

Se realizó el cálculo de la aceleración gravitatoria de acuerdo con la expresión (2), tomando la latitud de Cienfuegos (22,14960) y su ubicación al nivel del mar, y se obtuvo el valor $g = 9,78766 \pm 0,00098 \text{ m/s}^2$. Este valor se empleó como referencia para el cálculo de las incertidumbres relativas de los valores de la aceleración gravitatoria obtenida usando cada instrumento que aparecen en la tabla 1.

La propagación de la incertidumbre para la aceleración gravitatoria en términos de las incertidumbres presentes en la medición de la longitud del péndulo y el período de sus oscilaciones nos conduce a:

$$\frac{\Delta g}{g} = 2 \frac{\Delta T}{T} + \frac{\Delta L}{L} \tag{4}$$

En la tabla 1 aparecen las incertidumbres y los valores finales expresados por intervalos de valores posibles de acuerdo con las incertidumbres. De su análisis resulta evidente que un aumento en la exactitud de los instrumentos de medición trae consigo un aumento en la exactitud y precisión de las magnitudes determinadas mediante ellos.

Tabla 1. Exactitud de los instrumentos de medición, valores de la aceleración gravitatoria e incertidumbres

INSTRUMENTO DE MEDICIÓN	$\Delta T, \text{S}$		$\Delta G, \text{m/s}^2$	$G \pm \Delta G \text{ m/s}^2$	$\Delta G/G, \%$
Cronómetro analógico	0,1	0,101	1,01	$9,99 \pm 1,01$	2,1
Cronómetro digital	0,01	0,011	0,11	$9,88 \pm 0,11$	1,0
Sistema HPCI-1	0,001	0,002	0,02	$9,78 \pm 0,02$	0,0078

En la figura 4 se han representado los resultados de las mediciones de la aceleración gravitatoria por los tres tipos de instrumentos mostrando sus intervalos de confianza. Como se puede apreciar, las mediciones se hacen más exactas y precisas al transitar desde el instrumento analógico hacia la interfaz.

Con respecto al segundo objetivo, la figura 5a presenta el aspecto de los datos de las corridas para los tres péndulos con esferas de diferentes materiales y masas ofrecidos por el sistema HPCI-1 para el trabajo

ejecutado. De aquí se podían obtener los datos para procesarlos de la otra manera descrita empleando Excel.

El sistema también brindaba las gráficas ajustadas con los valores de las pendientes. Estas se muestran en las figuras 5b, 5c y 5d para las esferas de acero, aluminio y madera, respectivamente. De aquí se podían obtener los valores de la aceleración gravitatoria.

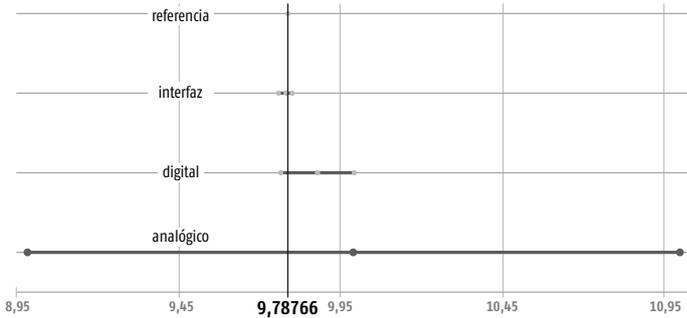


Figura 4. Representación de los resultados de las mediciones de g mostrando los correspondientes intervalos de confianza.

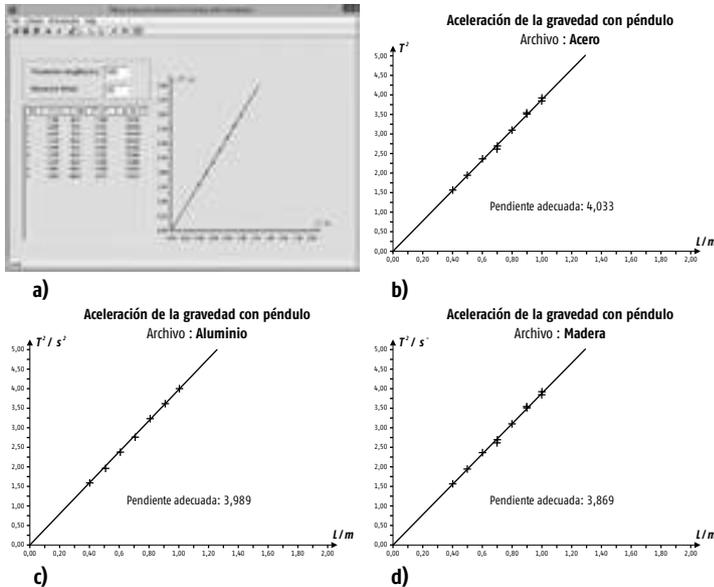


Figura 5. (a). Aspecto de los datos de las corridas ofrecidos por el sistema HPCI-1. Gráficas ajustadas T^2 contra L con los valores de las pendientes para los péndulos con esferas de acero (b) aluminio (c) y madera (d) respectivamente.

En la figura 6 se muestra una gráfica que contiene el procesamiento para los tres péndulos, en los que aparecen las ecuaciones de ajuste con sus parámetros y el coeficiente R^2 . Los valores de la pendiente corresponden a la aceleración gravitatoria.

Como se puede observar, el valor experimental más cercano al valor teórico calculado según la ecuación (2) se obtuvo para el péndulo con la esfera de acero, que era la más pesada. A continuación, le sigue el valor obtenido para el péndulo con esfera de aluminio y, por último, la del péndulo con esfera de madera. De acuerdo con eso, las incertidumbres relativas al tomar como referencia el valor calculado usando (2) fueron 1,0 %, 1,7 % y 3,2 %.

De las observaciones relativas al tiempo en que se atenúan las amplitudes angulares de las oscilaciones desde el valor inicial de 5° hasta 2° o de la amplitud angular de las oscilaciones de los tres péndulos al cabo de un tiempo igual a 10 períodos, que se muestran en la tabla 2, se puede concluir que estos ejecutan un movimiento amortiguado y que los efectos son mayores a medida que se reduce la masa del péndulo.

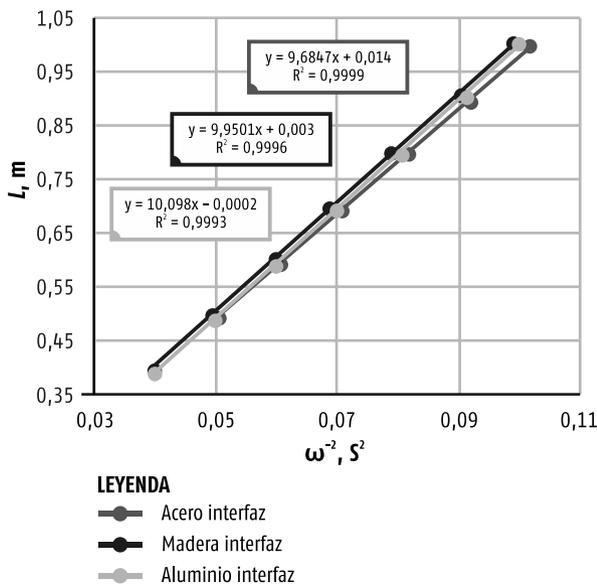


Figura 6. Gráficas ajustadas de L contra el inverso de ω^2 con los valores de la pendiente para los tres péndulos con esferas de diferentes masas.

Tabla 2. Parámetros para evidenciar la atenuación de las oscilaciones de los péndulos de diferentes masas

MATERIAL DE LA ESFERA	MASA, G	TIEMPO DESDE 5° A 2°	AMPLITUD LUEGO DE 30 PERÍODOS
Acero	26,9	306,8 s	4,0°
Aluminio	9,8	71,4 s	3,0°
Madera	2,4	51,3 s	1,9°

De ambos resultados se puede concluir que, de los tres péndulos empleados, el que posee mayor masa tiene un comportamiento más cercano al movimiento armónico y por ello los valores de la aceleración gravitatoria calculados bajo esta hipótesis se corresponden mejor con los esperados. Para los otros dos péndulos los efectos de la fuerza de fricción se hacen más notables y, por ende, se alejan más de la condición de armónico; por tanto, los resultados obtenidos bajo este supuesto tienen menos correspondencia con los valores esperados.

Introduciendo el término de la fricción viscosa del tipo $f = -bv$ en la ecuación diferencial, se puede arribar a las expresiones de la frecuencia angular para el caso infraamortiguado y de cómo decrecen las amplitudes de las oscilaciones con el tiempo, que se ofrecen a continuación:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{L} - \frac{b^2}{4m^2}} \quad (3)$$

$$\theta(t) = \theta_{\max} e^{-\frac{b}{2m}t} \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (4)$$

Los valores del término $b/2m$, que determina los efectos de la fricción en la amplitud y frecuencia de las oscilaciones, para las tres esferas son pequeños y sus cuadrados son aún menores. Por ello, los efectos en el corrimiento de la frecuencia angular, que podrían dar lugar a un cambio en el período de las oscilaciones, no son notables y sí el decaimiento de las amplitudes, pues dicho término se encuentra en el exponente de una función exponencial decreciente, que es una función de rápida variación.

Gracias a las facilidades del sistema asistido por computadoras HPCI-1 las mediciones para los tres péndulos de diferentes masas se pueden realizar en un tiempo que se enmarca en el de una práctica de laboratorio. Esta circunstancia nos motiva a proponer un diseño para la práctica en que se realicen las mediciones para tres péndulos de

diferentes masas, se procesen con las facilidades del propio sistema y de conjunto con las observaciones de la amplitud en el tiempo, lo cual debe poner a los estudiantes en condiciones de responder a un grupo de preguntas que requieran del análisis de sus resultados. En esas preguntas debemos insistir en los aspectos más relevantes de las oscilaciones y rebasar en profundidad los conocimientos del nivel medio superior, que se restringe al caso estrictamente armónico. Como se observa, se pueden introducir consideraciones relativas a la presencia de la fuerza de fricción y su influencia en las características principales del movimiento.

Conclusiones

Se pudo evidenciar, para el caso concreto del péndulo, que el incremento de la exactitud de los instrumentos de medición, como consecuencia de su evolución tecnológica, aumenta la exactitud y precisión de los resultados obtenidos con ellos.

Las facilidades de los sistemas de prácticas de laboratorio asistidos por computadoras permiten aumentar el número de tareas a realizar por el estudiante dentro del horario de una práctica de laboratorio.

El profesor debe diseñarse estas tareas de manera que incluya la modificación de algún parámetro o condiciones experimentales que provoquen un cambio y, de acuerdo con esto, debe formular un conjunto de interrogantes a responder a partir del análisis de sus resultados.

Debe ponerse cuidado en no repetir resultados conocidos del nivel precedente, pues es necesario avanzar en el nivel de profundidad de los conocimientos y habilidades propios del nivel superior.

Bibliografía

- AMORE, P. *et al.* (2007): «The Nonlinear Pendulum: Formulas for the Large Amplitude Period», *Revista Mexicana de Física E*, vol. 53, n.º 1, pp. 106-111.
- AMRANI, D.; PARADIS y M. BEAUDIN (2008): «Approximation Expressions for the Large-angle Period of a Simple Pendulum Revisited», *Revista Mexicana de Física E*, vol. 54, n.º 1, pp. 59-64.
- ICS ELECTRONICS (s. f.): «Aplicación Notes for Interfaces: Serie, GPIB, VXI, VXI-11 Ethernet», <https://www.icselect.com/ab_note.html#anchor338658> [22/10/2018].
- KIDD, R. B. y S. L. FOGG (2002): «A Simple Formula for the Large-angle Pendulum Period», *Physics Teacher*, vol. 40, pp. 81-83.

- MORITZ, H. (1988): «Geodetic Reference System 1980», *Bulletin Géodésique*, vol. 62, n.º 3, pp. 348-358, <<https://link.springer.com/article/10.1007/BF02520722>> [22/10/2018].
- SALINAS-HERNÁNDEZ, E. *et al.* (2017): «Approximate frequencies of the pendulum for large angles», *Revista Mexicana de Física E*, vol. 63, pp. 6-11.
- «Standard Commands for Programmable Instruments (SCPI) Volume 1: Syntax and Style. Version 1999.0» (1999), <<http://www.ivifoundation.org/docs/scpi-99.pdf>> [25/1/2019].
- TEKTRONIX (s. f.): «Tektronix families: TBS-XXXX, TDS-XXXX Digital Oscilloscope Programmer Manual», <<https://www.tek.com/oscilloscope/tds1000-manual>> [25/1/2019].
- THULIN, A. (1992): «A “Standardized” Gravity Formula», *Bulletin OIML*, n.º 129, Juin.



Registro eléctrico de las oscilaciones mecánicas, ventajas para el estudio de los casos más generales

ARCELIO HERNÁNDEZ FERREIRA,* OTHMAN ESPINOSA VALDÉS*

Introducción

En la mayoría de los cursos de Física General de la enseñanza media y la superior, exceptuando los de las carreras de Física, se aborda el estudio del péndulo simple en el caso estrictamente armónico, en que no se consideran los efectos de la fuerza de fricción del cuerpo con el medio en el cual se mueve y se reducen sus oscilaciones a ángulos pequeños (aquellos para los cuales $\sin \theta \approx \theta$). Existen numerosos trabajos dedicados al estudio del caso cuando las oscilaciones no son pequeñas y no se considera la fricción (Kidd y Fogg, 2002; Millet, 2003; Parwani, 2004; Amore *et al.*, 2007; Amrani, Paradis y Beaudin, 2008; Torzo y Peranzoni, 2009; Salinas-Hernández *et al.*, 2017); sin embargo, son más escasos los que, considerando las oscilaciones pequeñas, toman en cuenta los efectos de la fricción (Chávez, 2017). Para otros sistemas como el cuerpo resorte hay algunos reportes.

El propósito del presente trabajo es mostrar los efectos de la fuerza de fricción en un péndulo simple que ejecuta oscilaciones pequeñas y que, por tanto, no puede considerarse armónico, ya que es amortiguado. Para ello, hacemos uso del registro eléctrico de las oscilaciones de este y procesamos la información de dichos registros para mostrar las características del movimiento amortiguado y extraer parámetros importantes que lo describen.

1. Materiales y métodos

Se empleó el montaje con los accesorios del trabajo de laboratorio 1 de la sección de Oscilaciones y Ondas titulado «Isocronismo del

* Departamento de Física, Facultad de Ingeniería, Universidad de Cienfuegos, Cuba.

péndulo simple», que aparece entre en el sistema de prácticas de laboratorio de Física asistido por computadora HPCI-1 de la firma Star Sensor Ltd (U-Star Sensor Technology Co., Ltd., 2004a; 2004b). En la figura 1 aparece un esquema del montaje y del soporte donde se coloca el péndulo.

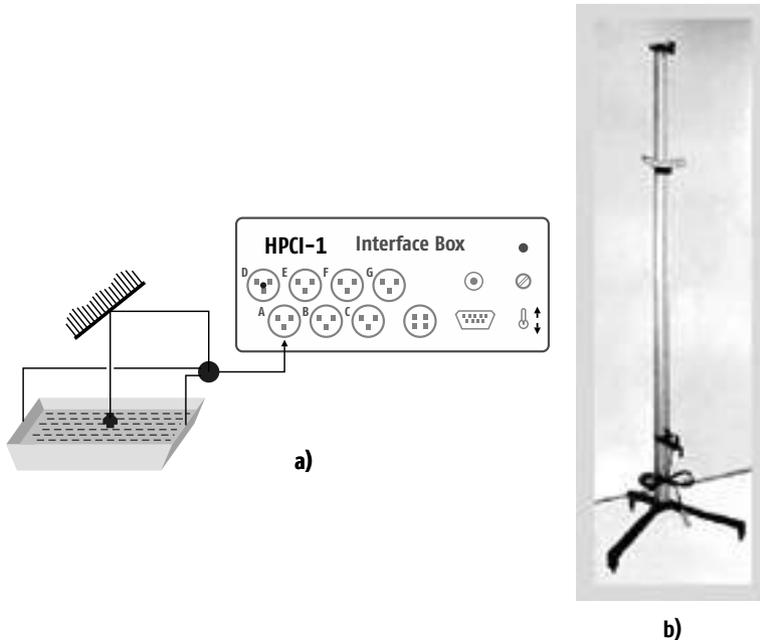


Figura 1. a. Esquema del montaje. b. Soporte para colocar los péndulos.

Se empleaba el sensor de voltaje A con tres terminales, dos de los cuales medían la diferencia de potencial entre los electrodos. Un tercer terminal detectaba la diferencia de potencial respecto al electrodo negativo de una aguja metálica colocada en el extremo de la esfera que, en contacto con el agua, oscilaba entre los electrodos.

La figura 2a muestra los detalles de las agujas insertadas en las esferas y la 2b, la cubeta con la ranura y los electrodos. En calidad de hilo se usaba un alambre fino de cobre ensartado en el ojo de la aguja. El soporte tenía la posibilidad de nivelación con tres tornillos en sus patas para garantizar el movimiento de oscilación del cuerpo en un plano. Variando la distancia desde donde se colgaba el péndulo se obtenían diferentes valores de su longitud.

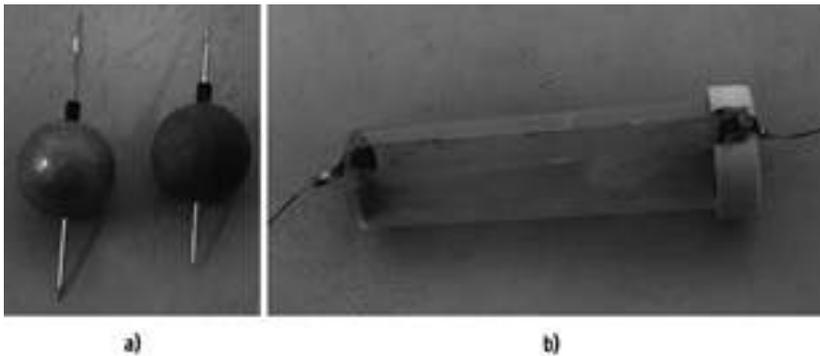


Figura 2. a. Detalles de las esferas con agujas. b. Cubeta empleada.

La esfera oscilaba siempre a la misma altura a lo largo de una ranura de la cubeta cilíndrica especialmente diseñada con dos electrodos circulares de cobre y que contenía agua. Los detalles se muestran en la figura 3a y en la 3b se observa la instalación en su conjunto.

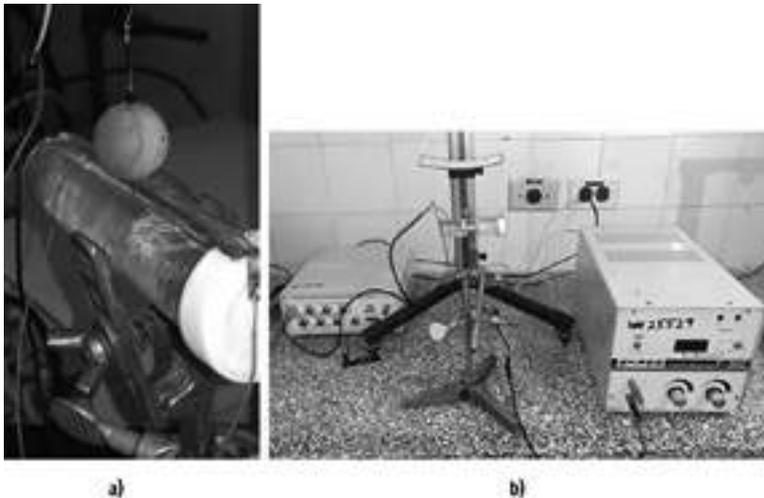


Figura 3. a. Detalles de la esfera con aguja que oscilan a través de la ranura de la cubeta. b. El montaje en su conjunto.

Al aplicar una diferencia de potencial a los dos electrodos en el volumen de agua, entre ambos se establece un campo eléctrico relativamente uniforme y la diferencia de potencial respecto al

electrodo negativo varía de forma lineal con la distancia a este. El resultado se puede obtener de la solución de la ecuación de Laplace para el potencial eléctrico en este caso y aparece en cualquier libro de texto de los cursos de Física (Halliday, Resnick y Krane, 1992; Serway y Jewett, 2003). Ejecutando el *software* asociado con este trabajo se pudieron obtener los registros del potencial eléctrico correspondientes a las elongaciones angulares de los tres péndulos. Los registros se hicieron para diferentes intervalos de tiempo de las oscilaciones: para 10 s, para 25 s y para más de 90 s.

En las figuras 4, 5 y 6 se muestra el aspecto de estos registros para intervalos diferentes de tiempo.

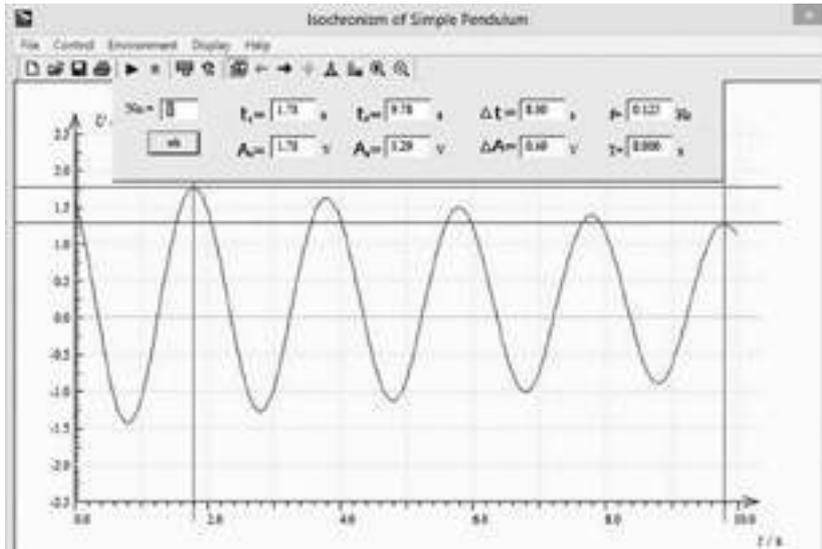


Figura 4. Registro del potencial en función del tiempo para el péndulo de madera en un intervalo de 10 s.

Una vez obtenidos los registros, se hizo uso de la herramienta Analyze del HPCI-1, con la cual se pueden obtener de las gráficas de potencial en función del tiempo los valores del potencial para los diferentes instantes de tiempo. En nuestro caso, decidimos medir los valores del potencial en los puntos de máxima elongación, de esta manera la diferencia entre los dos instantes de tiempo era igual al período de oscilación del péndulo.

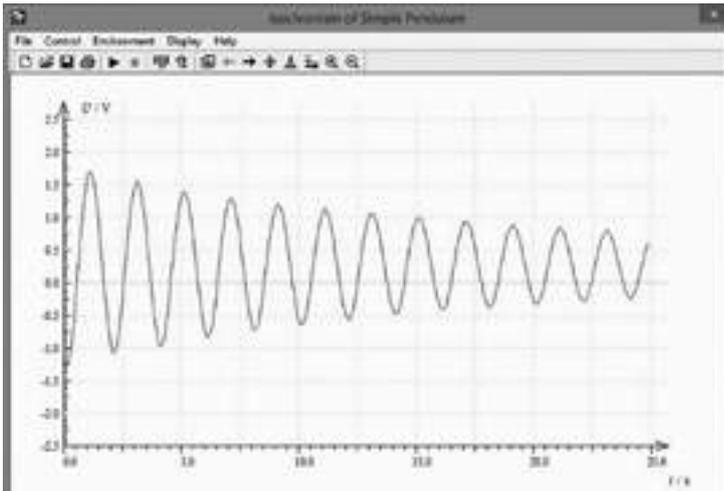


Figura 5. Registro del potencial en función del tiempo para el péndulo de madera en un intervalo de 25 s.

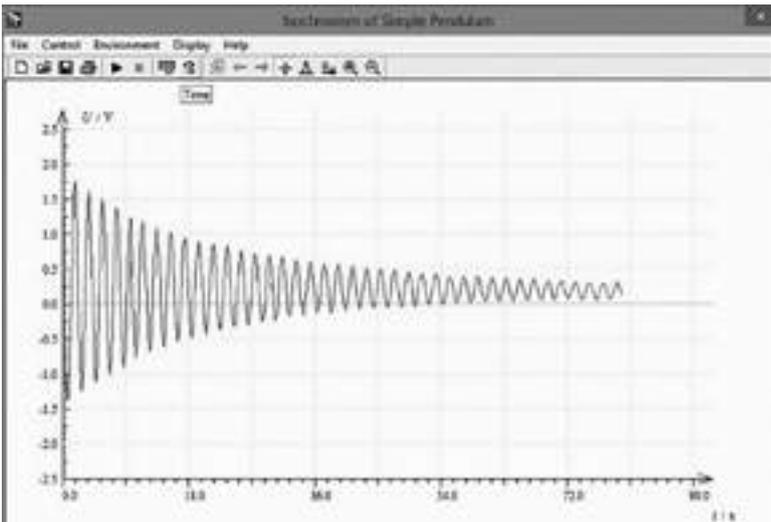


Figura 6. Registro del potencial en función del tiempo para el péndulo de madera en un intervalo de 90 s.

En las figuras 4 y 7 se muestra el aspecto de la pantalla correspondiente a la medición del potencial con el Analyze en dos instantes de tiempo.

Estos pares de valores se registraron y se construyeron las tablas para luego procesarlos empleando Excel de Microsoft. Se construyeron

las gráficas del potencial $V(t)$ contra tiempo t y del logaritmo del potencial $\ln V(t)$ contra el tiempo t . La primera se ajustó de acuerdo con una ley exponencial y la segunda de acuerdo con una dependencia lineal. En ambos casos Excel brinda las ecuaciones de ajuste y el valor del parámetro R^2 que caracteriza el grado de correspondencia con las funciones de ajuste.

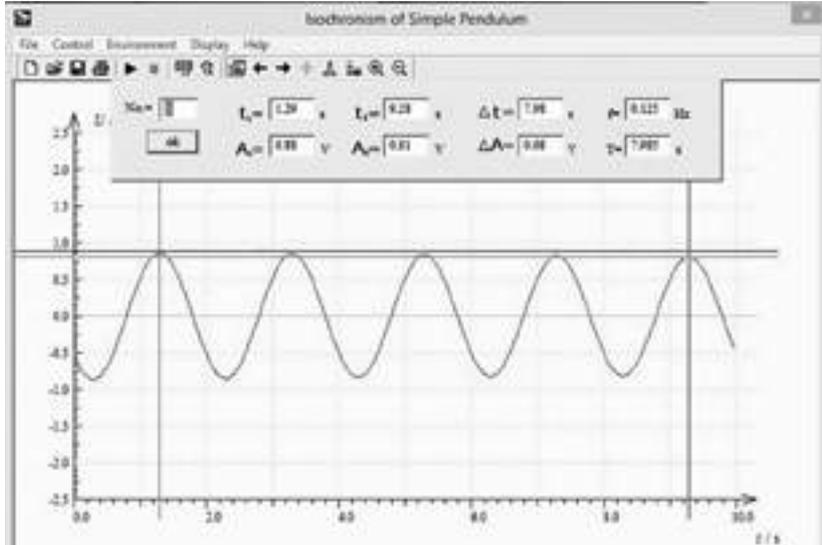


Figura 7. Registro del potencial en función del tiempo para el péndulo de aluminio en un intervalo de 10 s; muestra los valores de la herramienta Analyze para dos instantes de tiempo separados por 4 períodos.

2. Resultados y discusión

La observación de gráficas como las mostradas anteriormente evidenció que el movimiento de los péndulos en todos los casos era infra (o sub) amortiguado.

Admitiendo que la fuerza de fricción entre la esfera y el aire circundante donde se mueve es del tipo viscosa, que puede ser descrita en la forma $f = -bv$, la ecuación diferencial que describe el movimiento es:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{b}{m} \frac{d\theta}{dt} + \frac{g}{L} \theta = 0 \quad (1)$$

cuya solución viene dada por:

$$\theta(t) = \theta_{max} e^{-\frac{b}{2m}t} \cos(\omega t + \phi_0) \tag{2}$$

donde la frecuencia angular ω de las oscilaciones es:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{L} - \frac{b^2}{4m^2}} \tag{3}$$

La ecuación (2) indica que la amplitud de las oscilaciones decae exponencialmente con el tiempo y que el parámetro $\gamma = b/2m$ determina la rapidez de la atenuación que tiene lugar. Asimismo, la ecuación (3) indica que $\gamma^2 = b^2/(4m^2)$ determina el corrimiento de la frecuencia angular respecto al valor de esta para el caso estrictamente armónico (sin fricción). Es por ello que la obtención de este parámetro γ , denominado coeficiente de amortiguamiento, es importante y en ello centramos nuestra atención.

En la tabla 1 se presentan los valores de los potenciales para diferentes instantes de tiempo para el péndulo con esfera de madera. Como esta, se confeccionaron también para los otros dos péndulos. El período de las oscilaciones en cada caso se obtuvo como el promedio de las diferencias de tiempo entre los instantes correspondientes a los valores máximos y mínimos del potencial.

Tabla 1. Valores del potencial, su logaritmo y el período para distintos instantes de tiempo del péndulo con esfera de madera

T, s	$V(t), V$	$LN V(t)$	T, s
1,15	1,71	0,53649337	...
3,15	1,54	0,43178242	2
5,15	1,38	0,3220835	2
7,12	1,29	0,25464222	1,97
9,12	1,19	0,17395331	2
11,15	1,15	0,13976194	2,03
13,12	1,04	0,03922071	1,97
15,12	1,01	0,00995033	2
17,12	0,93	-0,07257069	2
19,12	0,88	-0,12783337	2
21,12	0,83	-0,18632958	2
23,12	0,79	-0,23572233	2
T promedio		1,99727273	

En las figuras 8, 9 y 10 se muestran $V(t)$ y \ln de $V(t)$ contra t para cada uno de los tres péndulos con esferas de masas diferentes. En estas aparecen las ecuaciones de ajuste y en ellas el coeficiente de amortiguamiento γ .

Como se puede observar, los valores del coeficiente de amortiguamiento aumentan con la disminución de la masa de la esfera. De la ecuación (3) es posible encontrar la razón entre la frecuencia angular de oscilación en el caso amortiguado respecto a la frecuencia angular del caso armónico, que viene dada por:

$$\frac{\omega}{\omega_0} = \sqrt{1 - \left(\frac{\gamma}{\omega_0}\right)^2} \quad (4)$$

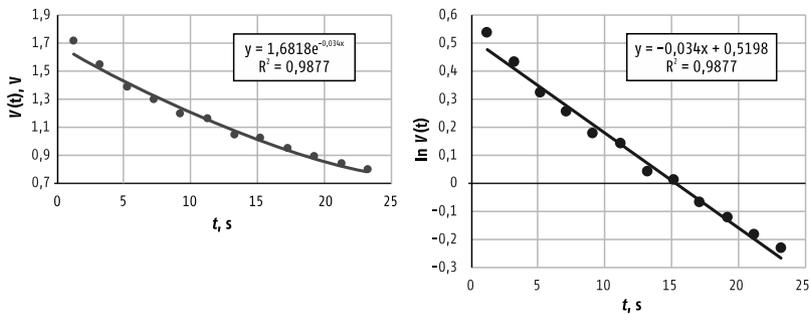


Figura 8. $V(t)$ y $\ln V(t)$ contra t ajustadas, que muestran las ecuaciones de ajuste donde aparece el coeficiente de amortiguamiento γ y el parámetro R^2 para el péndulo con esfera de madera.

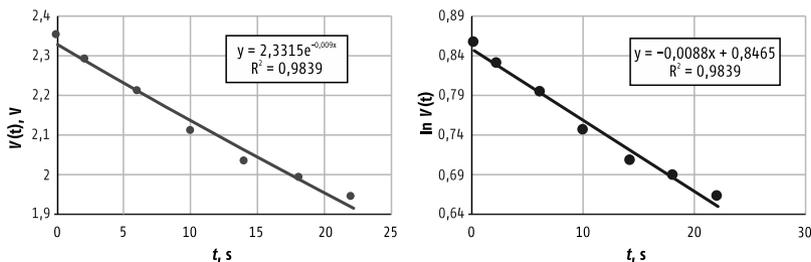


Figura 9. $V(t)$ y $\ln V(t)$ contra t ajustadas, que muestran las ecuaciones de ajuste donde aparece el coeficiente de amortiguamiento γ y el parámetro R^2 para el péndulo con esfera de aluminio.

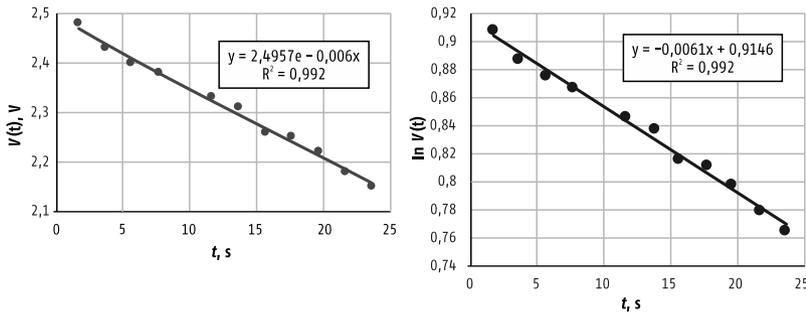


Figura 10. $V(t)$ y $\ln V(t)$ contra t ajustadas, que muestran las ecuaciones de ajuste donde aparece el coeficiente de amortiguamiento γ y el parámetro R^2 para el péndulo con esfera de acero.

En la tabla 2 se brinda un resumen de los valores de los coeficientes de amortiguamiento γ , de sus cuadrados, de la razón entre la frecuencia angular de oscilación en el caso amortiguado respecto a la frecuencia angular del caso armónico y del valor del término $e^{(-\gamma t)}$ para 90 s.

Tabla 2. Valores de γ , γ^2 , ω/ω_0 y $e^{-\gamma t}$ para 90 s para los tres péndulos

MASA, g	γ , s^{-1}	γ^2 , s^{-2}	$\frac{\omega}{\omega_0}$	$e^{-\gamma t}$ PARA 90s
26,9	0,0061	0,00003721	0,999998098	0,577527049
9,8	0,0088	0,00007744	0,999996041	0,452938013
2,4	0,034	0,001156	0,999940898	0,046887695

Del análisis de esta tabla se puede llegar a la conclusión de que, en este caso, la fricción de la esfera con el aire no trae consigo un cambio significativo en la frecuencia de oscilación del péndulo respecto a la frecuencia de oscilación del caso armónico. Tal vez a ello se deba que el título del trabajo sea «Isocronismo del péndulo simple» y que en sus objetivos plantee que el movimiento es armónico simple si las oscilaciones son pequeñas.

El trabajo solo está planteado para realizarlo con la esfera de acero, que es aquella en que los efectos son menores. De hecho, algunos registros hechos por nosotros con la esfera de acero para intervalos de tiempo cortos no detectaban cambio en la amplitud, como se puede observar en las figuras 11 y 12.

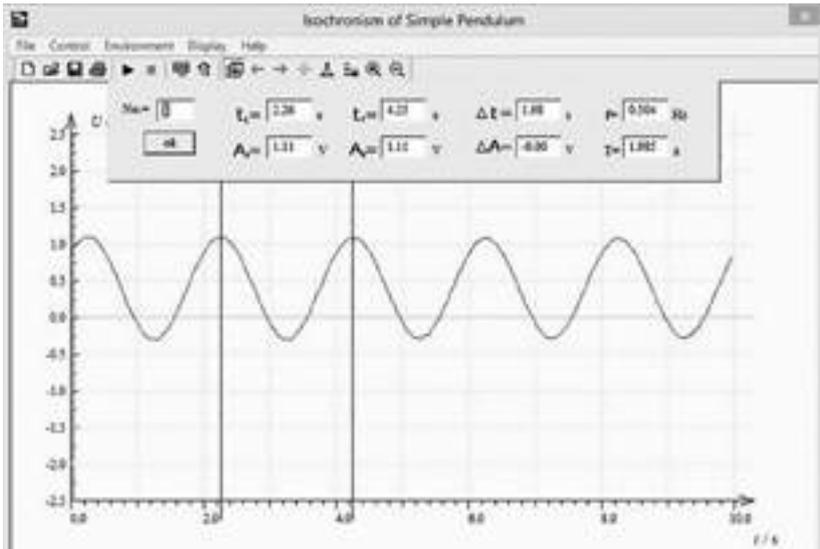


Figura 11. Amplitudes de las oscilaciones de dos máximos en dos instantes de tiempo separados por un período para el péndulo con esfera de acero para un intervalo de 10 s.

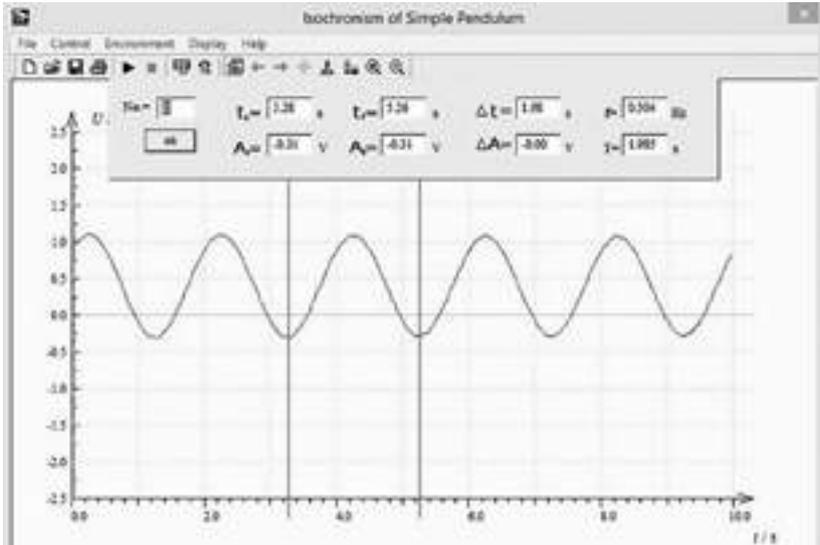


Figura 12. Amplitudes de las oscilaciones de dos mínimos en dos instantes de tiempo separados por un período para el péndulo con esfera de acero para un intervalo de 10 s.

Evidentemente, el registro eléctrico de las oscilaciones del péndulo permite estudiarlo en un caso más general que el armónico, que ya ha sido objeto de estudio en los niveles de enseñanza anteriores. Con este tenemos la oportunidad de mostrarle a los estudiantes cómo tratar el caso amortiguado que se presenta en la realidad cuando tenemos en cuenta la fuerza de fricción. Podemos explicarles por qué las variaciones en la frecuencia son menos perceptibles que en las amplitudes y el papel que desempeña la masa del cuerpo en esto.

Conclusiones

El registro eléctrico de las oscilaciones mecánicas, que se puede obtener con el sistema HPCI-1, permite realizar el estudio del movimiento del péndulo simple ejecutando oscilaciones pequeñas en presencia de fuerza de fricción del cuerpo con el aire cuando el movimiento ya no es armónico simple, sino inframortiguado.

Respecto al movimiento armónico simple, la característica del movimiento amortiguado que más difiere es la amplitud de las oscilaciones y no su frecuencia angular.

Esta práctica de laboratorio prepara al estudiante para el estudio experimental de otros tipos de oscilaciones como las electromagnéticas presentes en un circuito RLC.

Bibliografía

- AMORE, P. *et al.* (2007): «The Nonlinear Pendulum: Formulas for the Large Amplitude Period», *Revista Mexicana de Física E*, vol. 53, n.º 1, pp. 106-111.
- AMRANI, D.; P. PARADIS y M. BEAUDIN (2008): «Approximation Expressions for the Large-angle Period of a Simple Pendulum Revisited», *Revista Mexicana de Física E*, vol. 54, n.º 1, pp. 59-64.
- CHÁVEZ, M. (2017): «Las oscilaciones amortiguadas de un péndulo simple utilizando una cámara digital, como un caso de innovación en la enseñanza de la Física», *SCIÉND0*, vol. 20, n.º 1, pp. 31-37.
- HALLIDAY, D.; R. RESNICK y K. KRANE (1992): *Física*, New York: John Wiley and Sons. Cuarta edición ampliada.
- KIDD, R. B. y S. L. FOGG (2002): «A Simple Formula for the Large-angle Pendulum Period», *Physics Teacher*, vol. 40, pp. 81-83.
- MILLET, L. E. (2003): «The Large-angle Pendulum Period», *Physics Teacher*, vol. 41, pp. 162-163.
- PARWANI, R. R. (2004): «An Approximate Expression for the Large-angle Period of a Simple Pendulum», *European Journal of Physics*, vol. 25, pp. 37-39.

- SALINAS-HERNÁNDEZ, E. *et al.* (2017): «Approximate Frequencies of the Pendulum for Large Angles», *Revista Mexicana de Física E*, vol. 63, pp. 6-11.
- TORZO, G. y P. PERANZONI (2009): «The Real Pendulum: Theory, Simulation, Experiment», *Latin-American Journal of Physics and Education*, vol. 3, n.º 2, pp. 221-228.
- SERWAY, R. A. y J. W. JEWETT (2003): *Physics for Scientists and Engineers*, Belmont, California: Brooks/Cole.
- U-STAR TECHNOLOGY CO., LTD. (2004a): «HPCI-1 Computer Aided physics laboratory. Application Manual. Version 4.0», Shanghái.
- U-STAR TECHNOLOGY CO., LTD. (2004b): «HPCI-1 Computer Aided physics laboratory. Experiment Manual. Version 4.0», Shanghái.



Uso de sensores de efecto Hall para la medición de campos magnéticos débiles generados en el laboratorio de Física y su aplicación en montajes dedicados al estudio del campo magnético

ARCELIO HERNÁNDEZ FERREIRA,* OTHMAN ESPINOSA VALDÉS,* CARLOS PITRE ANDRADE**

Introducción

Como regularidad, en la enseñanza de Física en la mayoría de los centros de educación superior del mundo se ha seguido la tradición de realizar experimentos en laboratorios especialmente equipados con experimentos ya estandarizados y con el uso de aparatos especiales adquiridos de ciertos proveedores de equipos de laboratorio como Leybold, Phywe, Griffin, Pasco, entre los más conocidos (LD Didactic, s. f.; PHYWE International, s. f.; Pasco, s. f.). Muchos de los sistemas experimentales que se comercializan son complejos y muy costosos, y no todas las instituciones disponen de los fondos necesarios para brindar a cada alumno la oportunidad de experimentar con esos equipos. A esto se une la creencia habitual de que un estudiante, para hacer un experimento, debe ir al laboratorio a trabajar con ese equipo especial y costoso. Esto también conduce a la opinión de que los experimentos de laboratorio de bajo costo son inferiores, que los resultados obtenidos en ellos no tienen el mismo grado de confiabilidad, exactitud o precisión y, por ende, no pueden considerarse genuinos.

La carencia de recursos en los países en desarrollo dificulta los avances en la educación científica, especialmente en Física. No obstante, lejos de ser un obstáculo, esto debe tomarse como una motivación adicional en nuestro esfuerzo para resolver el problema mediante el diseño y la construcción de experimentos «de bajo costo».

* Departamento de Física, Facultad de Ingeniería, Universidad de Cienfuegos, Cuba.

** Departamento de Ciencias Básicas, Facultad de Ingeniería y Administración, Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, Colombia.

En la literatura científica se ha asumido el término «equipo de bajo costo» y se publican numerosos artículos dedicados a mostrar cómo verificar leyes, fenómenos, etc. con el uso de variantes alternativas a los tradicionales y costosos equipos de laboratorio ofertados por las firmas comercializadoras. Como detalle interesante, además de los autores que pertenecen a países en desarrollo, para los cuales lo anterior es una necesidad natural, muchos físicos de países desarrollados también han asumido esta línea de trabajo.

En nuestra opinión, con imaginación e investigación se pueden diseñar experimentos de física de alta calidad, tanto para los cursos de introducción a la Física como para los de Física General de las carreras universitarias. Estos pueden ser realizados por los estudiantes en los laboratorios utilizando materiales y dispositivos de bajo costo.

En este trabajo ilustramos lo anterior presentando cómo, a partir de sensores de efecto Hall muy baratos, una fuente de voltaje CD y milivoltímetro (que generalmente existen en los laboratorios), podemos medir el campo magnético débil generado por los dispositivos a base de bobinas, que son de común empleo en los laboratorios de Física. Las mediciones son tan confiables como las de un gaussímetro e incluso, debido a que la magnitud del campo magnético que puede ser generado por tales dispositivos es del orden de los 10 G, resulta más adecuado que un militeslámetro profesional.

1. Materiales y métodos

Para la medición del campo magnético usando sensores de efecto Hall se construyeron dos sondas, una axial y otra transversal, de acuerdo con los esquemas mostrados en la figura 1. En este caso el sensor empleado fue el UGN 3503 de la Allegro Microsystems Inc. (Ratiometric, Linear Hall-Effect Sensors UGN3503LT, UGN3503U, and UGN3503UA. Data sheet 27501B). Se estudiaron sus principales características a partir de su hoja de datos (*data sheet*), las cuales aparecen en la tabla 1. En esta se muestran resaltadas por recuadros las de mayor importancia para nuestra aplicación. Como es común que los dispositivos producidos en grandes lotes presenten desviaciones respecto a los valores brindados en las hojas de datos, se verificaron experimentalmente los principales parámetros del sensor y, en particular, la característica de transferencia. Esta determina la

sensibilidad del sensor, que es el parámetro clave para su uso como medidor del campo magnético.

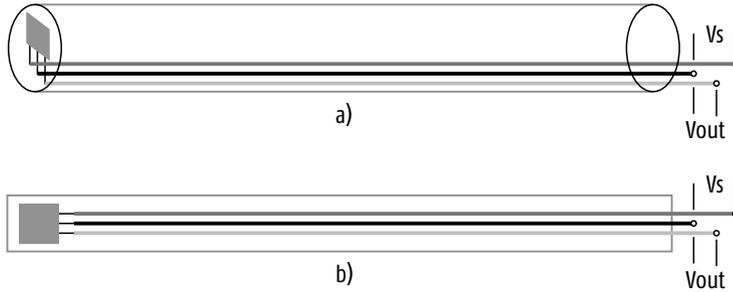


Figura 1. Esquemas con los detalles de la construcción de las sondas axial (a) y transversal (b).

Tabla 1. Principales características eléctricas del sensor UGN 3503

CARACTERÍSTICA	SÍMBOLO	CONDICIONES DE ENSAYO	LÍMITES			UNIDADES
			MÍN.	TÍPICO	MÁX.	
Voltaje de operación	V_{cc}	...	4,5	5,0	6,0	V
Suministro de corriente	I_{cc}	...	...	9,0	13	mA
Voltaje de salida a campo cero	V_{out}	B=0 G	2,25	2,5	3,0	V
Sensibilidad	ΔV_{out}	B=0 G hasta ± 900 G	0,75	1,30	1,75	mV/G
Ancho de banda (-3 dB)	BW	...	...	23	...	kHz
Nivel de ruido a la salida	V_{noise}	BW=10Hz hasta 10kHz	...	90	...	μ V
Resistencia de salida	R_{out}	...	...	50	...	Ω

El sensor se alimentó con el voltaje típico $V_{CC} = 5$ V y en ausencia de campo magnético, y se comprobó el voltaje a la salida del mismo V_{OUT} , que resultó ser 2,5 V. Con ayuda de un militeslámetro, un electroíman y su fuente de alimentación, pertenecientes a otro montaje del laboratorio, construimos la característica de transferencia del sensor, o sea, la dependencia del voltaje de salida del sensor con la magnitud del campo magnético actuando sobre este. En la figura 2 se muestra una foto del montaje empleado.



Figura 2. Montaje para la construcción de la característica de transferencia del sensor UGN 3503.

En la figura 3 se muestran los detalles de la ubicación de la sonda del militeslámetro y la sonda Hall del dispositivo en los polos del electroimán.

El voltaje de salida del sensor en presencia de campo magnético aumenta o disminuye linealmente en dependencia de la polaridad y la magnitud del campo a partir del valor 2,5 V, con una razón que viene dada por su sensibilidad. Esta es la pendiente de la característica de transferencia y su intercepto con el eje de las ordenadas resulta ser V_{OUT} .



Figura 3. Vista superior con los detalles de la ubicación del sensor Hall del dispositivo desarrollado (encima) y del sensor del militeslámetro (debajo) en los polos del electroimán.

Dado que el voltaje de salida es superior a 2 V, su magnitud no se puede medir con una alta precisión. Normalmente, para los voltímetros digitales en la escala de 20 V esta precisión es de 0,01 V (10 mV). Se decidió entonces implementar un divisor de voltaje con ayuda de un potenciómetro para el voltaje de alimentación a la entrada del sensor (que era de 5 V) y localizar el valor de 2,5 V que coincidía con el de la salida del sensor V_{OUT} en ausencia de campo magnético. Midiendo la diferencia de potencial entre este punto del divisor de voltaje y el voltaje de salida del sensor en ausencia de campo magnético obtuvimos el valor cero. Los valores de esta diferencia de potencial cuando el campo era diferente de cero resultaron del orden de los milivolts y al usar la escala de 2V del voltímetro digital la precisión de esta medición fue de 0,001 V (1 mV). Esto resultaba muy importante, dado que la sensibilidad reportada para el sensor en la hoja de datos era de 1,3 mV/G, y pretendíamos tener un dispositivo capaz de medir campos magnéticos débiles y que reaccionara para valores del orden de 1 G.

Una vez conocida la sensibilidad del sensor, lo empleamos para medir la magnitud del campo magnético generado por una bobina solenoide recta de 108 vueltas y longitud de 26,6 cm en su centro cuando por esta circulaba una corriente dada. El propósito era verificar la expresión teórica obtenida de aplicar la ley de Ampere:

$$B = \mu_0 \frac{N}{L} i \tag{6}$$

Para ello construimos la gráfica de B contra i y la ajustamos por mínimos cuadrados para obtener su pendiente. Lo mismo se hizo para un par de bobinas de Helmholtz de radio $R = 6,5$ cm y $N = 320$ vueltas, cuya expresión obtenida de la ley de Biot-Savart para el campo magnético es:

$$B = \frac{\mu_0 N i}{\left(\frac{5}{4}\right)^2 R} \tag{7}$$

Para la representación gráfica y el tratamiento de los datos experimentales se usó la hoja de cálculo Excel de Microsoft. Adicionalmente, se compararon las mediciones del dispositivo desarrollado con las de un militeslámetro profesional.

2. Resultados y discusión

En la figura 4 se muestra la característica de transferencia obtenida experimentalmente para el sensor UGN 3503 para valores del campo magnético aplicado desde -1300 G hasta +1300 G. Como se puede observar, el voltaje de salida se hace constante a partir de los ± 900 G, lo cual coincide con el intervalo de trabajo establecido por el fabricante (tabla 1).

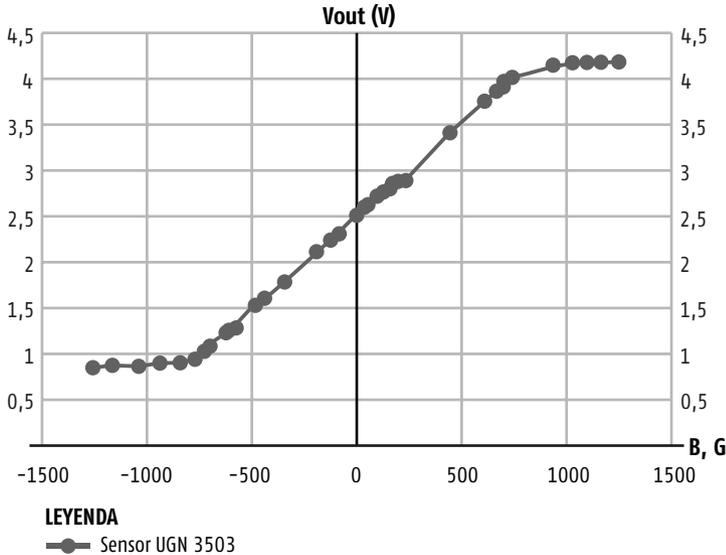


Figura 4. Característica de transferencia experimental del sensor UGN 3503.

Restringiendo los valores del campo magnético al intervalo recomendado por el fabricante, en el que su respuesta es lineal, realizamos un ajuste por el método de los mínimos cuadrados y determinamos la ecuación de esta, en la cual la pendiente se corresponde con la sensibilidad y el intercepto con V_{OUT} . En la figura 5 aparece la gráfica y su ecuación de ajuste.

De dicha ecuación obtenemos el valor experimental de la sensibilidad del sensor igual a 2,06 mV/G, superior a 1,30 mV/G, la especificada por el fabricante en la hoja de datos (tabla 1). Esto significa que, con un incremento de la magnitud del campo magnético de 0,5 G, el voltaje a la salida del sensor varía en 1 mV. Expresado en otros términos, si medimos con un milivoltímetro, nuestro dispositivo tiene una precisión de 0,5 G y por ello resulta adecuado para medir la magnitud de campos magnéticos débiles, tales como los que normalmente se generan por los dispositivos

empleados en nuestros laboratorios docentes (bobinas solenoides rectas, pares de bobinas de Helmholtz, bobinas toroides con núcleo de aire, otras bobinas de geometrías cuadradas, rectangulares, etc.).

Comparado con el militeslámetro profesional que tenemos en el laboratorio, con precisión de 1 mT (10 G), nuestro dispositivo puede realizar 20 mediciones en el intervalo de valores del campo magnético en que el militeslámetro registra un cambio en una unidad de su máxima precisión. Esto lo evidenciamos realizando mediciones simultáneas de la magnitud del campo magnético generado por un par de bobinas de Helmholtz con ambos instrumentos.

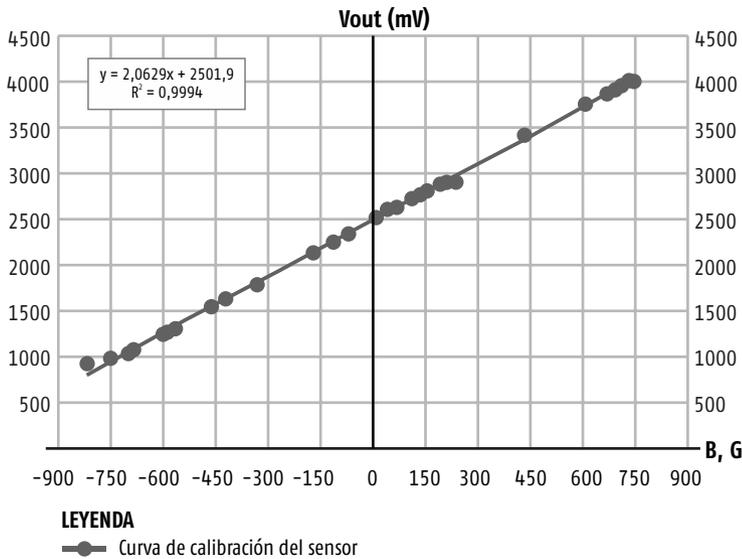


Figura 5. Curva de calibración del sensor ajustada para el intervalo de valores admisibles, según su hoja de datos; se muestra la ecuación de ajuste.

Variando el valor de la corriente que circulaba por las bobinas desde 0 A hasta 7 A pudimos disponer de 85 valores del campo cada 0,5 G con nuestro dispositivo, mientras que el militeslámetro apenas detectaba 4 valores de 1 mT cada uno. El valor final del campo era algo superior a 40 G.

La figura 6 representa la dependencia de la magnitud del campo magnético generado por una bobina solenoide recta con la corriente que circula por esta en su centro. Allí aparece la ecuación de ajuste con pendiente 5,30 G/A. Su valor teórico calculado es de 5,10 G/A, por lo que el error relativo es de 3,96 %.

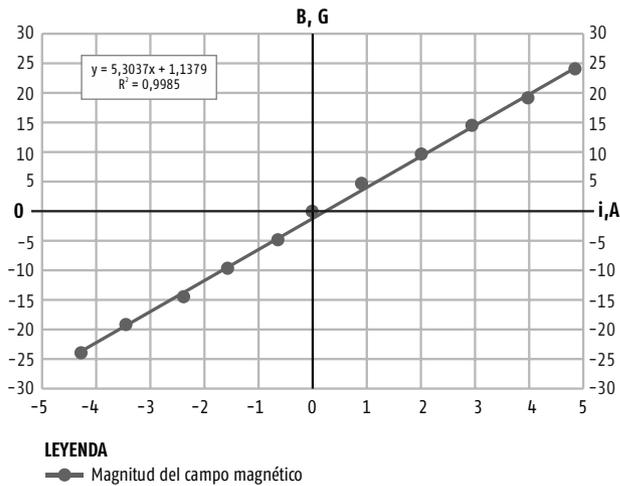


Figura 6. Dependencia de la magnitud del campo magnético en el centro de una bobina solenoide recta en función de la corriente que circula por ella, con la ecuación de ajuste.

En la figura 7 aparece la misma dependencia, pero para el par de bobinas de Helmholtz. Aquí la pendiente de la ecuación de ajuste es 5,43 G/A y el valor teórico calculado 5,71 G/A, para un error relativo de 4,9 %.

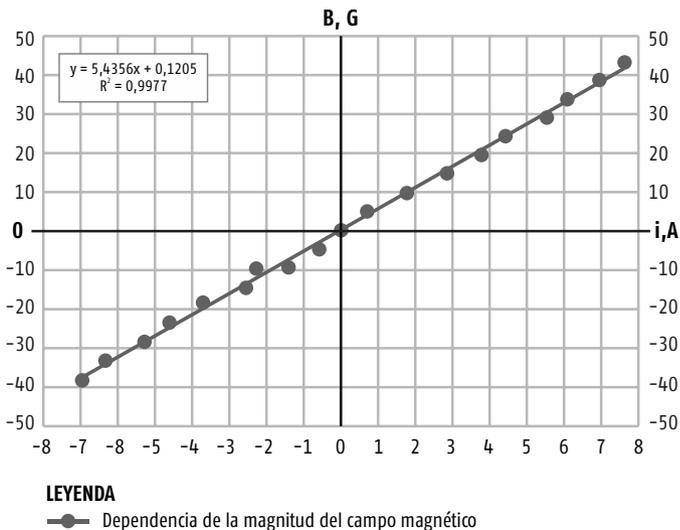


Figura 7. Dependencia de la magnitud del campo magnético para un par de bobinas de Helmholtz en función de la corriente que circula por ellas, con la ecuación de ajuste.

Conclusiones

Es posible construir un dispositivo simple y de bajo costo para medir con gran precisión la magnitud del campo magnético a partir del uso de sensores de efecto Hall.

El parámetro clave es la sensibilidad del sensor, que debe ser verificada experimentalmente porque puede diferir de la especificada en la hoja de datos de este ofrecida por los fabricantes.

Los resultados obtenidos con las sondas construidas para medir el campo magnético en un solenoide recto y en un par de bobinas de Helmholtz fueron muy satisfactorios y sirvieron de verificación de las expresiones de cálculo del campo magnético generadas por tales sistemas. Los valores de las constantes de proporcionalidad experimentales y teóricas difieren en menos de un 5 % en sus valores.

El dispositivo construido resultó más adecuado que un militeslámetro profesional para medir campos magnéticos débiles (< 40 G).

Bibliografía

- LD DIDACTIC (s. f): «Catalogues», <<https://www.ld-didactic.de/en/catalogues.html>> [25/1/2019].
- PASCO (s. f): «Pasco Products», <<https://www.pasco.com/products/index.cfm>> [25/1/2019].
- PHYWE INTERNATIONAL (s. f): «Catálogo de Productos PHYWE», <<http://www.phywe-es.com/1003/Productos.htm>> [25/1/2019]



IV. Uso de las tecnologías



Implementación de una *toolbox* en *Wolfram Language* para la impartición de las clases de Física General

ANDRÉS SOLANO GARCÍA,* JULIO C. DRAKE-PÉREZ**

Introducción

La innovación didáctica para elevar la calidad de la docencia impartida es uno de los aspectos priorizados en los nuevos planes de estudio en las universidades cubanas. El uso intensivo de las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) se ha convertido en una de las principales fuentes para avanzar en esa dirección. Con este uso intensivo aparecen diversos factores que pueden influir negativamente en el desarrollo fluido de una clase. Se hace necesario optimizar el proceso de interacción con la tecnología que apoya la docencia, y evitar, en lo posible, la ocurrencia de «*gaps* tecnológicos» que, a menudo, provocan interrupciones embarazosas y pérdida de tiempo, lo que conspira contra la calidad de la actividad docente. A continuación, se enumeran algunas de las problemáticas más comunes:

1. Con frecuencia se hace necesario interrumpir una presentación para realizar búsquedas de videos, documentos y otros materiales, tanto en la computadora que usamos como en Internet, desde la red local, para ejemplificar un contenido dado. También a menudo es necesario intercambiar información entre diferentes *software* cerrando uno y abriendo otro.
2. Muchas veces no se cuenta con aplicaciones dinámicas en tiempo real (gratuitas) para simular conceptos de difícil interpretación.

* Instituto de Farmacia y Alimentos (IFAL), Universidad de La Habana, Cuba.

** Facultad de Física, Universidad de La Habana, Cuba.

3. Al mostrar experimentos o simulaciones, la visibilidad no siempre es la adecuada en todos los lugares del aula.
4. A menudo necesitamos anotar o recordar cierta información para usarla posteriormente en algún ejercicio en específico.
5. El celular se ha hecho omnipresente y eso es inevitable. En nuestro entorno aún no logramos convertirlo en un aliado del proceso de enseñanza-aprendizaje, sino que es visto como enemigo, un elemento distractor. Un cambio en esa dinámica tendría un efecto positivo innegable.

Con la herramienta desarrollada se optimiza de manera considerable el tiempo al solucionar, entre otras, las problemáticas antes enumeradas, de modo que se contribuye al desarrollo fluido de las clases en que se hace un uso intensivo de las TIC.

Nuestra herramienta es fácilmente expandible, por lo que se pueden agregar otras funciones, ampliar así el diapazón de posibilidades y ajustarla a las preferencias personales y necesidades específicas.

Otro aspecto significativo, verificado en su utilización, es que despierta el interés en los estudiantes por su novedad, aplicaciones y características visuales, con lo que se gana en motivación por la clase. La cuestión motivacional es importante cuando, como es el caso, impartimos Física a estudiantes que no son de carreras de Física o Ingeniería, cercana a esta. En el caso que nos ocupa se trata de estudiantes de Ciencias Farmacéuticas. Estos, por lo general, y en especial en los primeros años de estudio, se enfrentan a la Física sin comprender su necesidad e importancia en su formación básica, y muestran un marcado rechazo que es necesario combatir en aras de lograr un ambiente adecuado.

Descripción de las prestaciones de la *toolbox*

Las funciones de la *toolbox* (caja de herramientas) son accesibles mediante un menú jerárquico que las organiza por medio de agrupaciones de íconos. A continuación se describen las opciones del menú y las funciones asociadas.

La *toolbox* en su estado actual posee dos grupos básicos al nivel más alto de jerarquía: en el primero se encuentran las herramientas de búsqueda (*Search*) y las aplicaciones (*Apps*), divididas en pestañas; en el segundo se encuentran funciones de uso diverso que facilitan acciones más complejas (*Utility*). Cada función es identificada con un ícono que

cuenta con una etiqueta de ayuda. El contenido de la ayuda es visible al posicionarse el cursor que identifica al ratón encima de ella.

Entre las funciones asociadas a la pestaña Search se encuentran las búsquedas en la PC, así como en la web con el navegador Firefox.

La figura 1 muestra una captura de pantalla de los grupos básicos de la aplicación con la opción Participación activada.



Figura 1. Grupos básicos de la aplicación con la opción participación activada.

Asociados con la etiqueta de las aplicaciones (*Apps*), varios íconos representan funciones de uso diverso:

1. Un reloj que permite planificar el tiempo de duración de un evento cualquiera, por ejemplo, activar la alarma para que suene a los 45 min de finalizada la clase, o para fijar el tiempo de resolución de un problema a fin de que el estudiante lo culmine en ese periodo.
2. Un convertidor de unidades que proporciona un acceso rápido a conversiones de unidades; se evita así que el estudiante lo haga desde su propio celular, de modo que se evaden posibles distracciones, al estar centrada su atención hacia donde se encuentra el profesor.
3. Una cámara web que funciona como visor para experimentos u objetos pequeños o frágiles; posibilita evitar la manipulación inadecuada o distracción de los estudiantes al pasar el objeto por los puestos de trabajo.
4. Un módulo programable (Recordatorio) similar al Stick Note de Windows®, en el que se escribe un mensaje para que aparezca en un tiempo determinado que incluye aviso sonoro.
5. Una pestaña etiquetada como Office, que permite el intercambio *flash* entre Wolfram Language® y Office® e incluye información de utilidad de ficheros de Power Point®, tales como el tamaño del fichero y último acceso a este; brinda la posibilidad de saber cuándo se editó por última vez cuando cambien alguno de estos dos parámetros.
6. El envío de datos (la propia clase, entre otros) vía wifi. Para identificar esta función se usa el ícono representativo de Zapyá® integrado en la aplicación. Esta función está diseñada para potenciar el uso del celular en las clases.

El segundo grupo (*Utility*), que se identifica con el ícono sombrero de graduación, posibilita abrir cuadernos de Wolfram Mathematica® con aplicaciones de visualización dinámica en tiempo real (figura 1). En este grupo también existe un botón denominado «Participación», cuya funcionalidad permite que el profesor acceda a la información del grupo (nombre y apellidos de los estudiantes, entre otros datos) desde una base de datos externa; mediante un proceso de selección aleatoria, que se inicia con un clic encima de los datos, se muestra el número

del estudiante con su nombre y apellidos, pertenecientes al registro de evaluación, para que ejecute alguna acción en clases (figura 2).



Figura 2. Uso del botón de participación en una captura de pantalla.

Conclusiones

Con esta herramienta se optimiza de manera considerable el tiempo de la clase, al solucionar, entre otras, las problemáticas planteadas en el texto. Es expandible, se pueden agregar más funciones y es de carácter gratuito (lo hace el profesor). Además, despierta el interés y la motivación de la clase gracias a sus aplicaciones y características visuales. Asimismo, favorece la comunicación visual con las aplicaciones dinámicas.

Para evaluar el grado de aceptación entre los estudiantes de la *toolbox* y su uso en clases se realizó un sondeo entre los 50 alumnos del curso. 82 % de ellos se expresaron favorablemente con respecto a la utilidad de esta y su uso en un entorno mixto, es decir, combinado con métodos tradicionales, que son los que han predominado y predominan en nuestro entorno educativo. De acuerdo con los resultados, se observa una valoración positiva por parte de los alumnos de esta metodología.



Materiales y Diseño: aspectos medioambientales y sociales. El caso del coltán

ANTONIO JOSÉ BERAZAÍN ITURRALDE,* CYNTHIA MOLINA GAMONAL*

Introducción

A partir del año 2004 se incorporó a la asignatura Materiales y Diseño, de la carrera de Diseño Industrial del Instituto Superior de Diseño (ISDi), el tema del diseño sustentable (Pérez y Berazaín, 2006). En este tema se presentan dos conceptos centrales: el ciclo de vida del producto y el análisis del ciclo de vida (Capuz y Gómez, 2002). Esto posibilita contribuir a formar una sensibilidad respecto al cuidado del medioambiente.

En 2011 se introdujo un tema para la clase de seminario relacionado con el mineral denominado «coltán», muy escaso y al mismo tiempo muy valorado por contener niobio y tantalio, dos metales indispensables para los equipos y dispositivos de alta tecnología (Bollero, 2009; Casas, 2014). La experiencia mostró que constituía una buena oportunidad para develar la importancia de conocer el origen de los materiales que conforman los productos de nuestro entorno artificial.

El 80 % de las reservas mundiales de ese mineral se encuentra en la República Democrática del Congo, donde la minería del coltán está asociada a violaciones de los derechos humanos, la explotación infantil y las guerras (figura 1) (Sutherland, 2011; Torres, 2014; González, 2017), de modo que el tema propicia una reflexión sobre la responsabilidad social del diseñador y una postura ética al respecto (Zito, 2014; Taffel, 2015).

La clase de seminario sobre el coltán ofrece la oportunidad de debatir en el aula sobre las consecuencias medioambientales y sociales que implica la obtención del coltán en tales condiciones (Durán *et al.*, 2018).

* Instituto Superior de Diseño, Universidad de La Habana, Cuba.

Este debate permite contribuir a la formación de valores como el humanismo, la justicia y la responsabilidad, a través del análisis de la repercusión social que implica la obtención del coltán (MES, 2016; Fresno, 2017).



Figura 1. Contexto en el que se extrae el coltán en la República Democrática del Congo.

1. Materiales y diseño

En el diseño de productos, el diseñador industrial debe considerar las características de los materiales que tiene a su disposición, esto es: sus propiedades, forma de obtención, procesos tecnológicos a los que pueden ser sometidos, impacto ambiental, precios, etc. Esta información decide, en no pocas ocasiones, el proyecto de diseño.

Por tal razón, el plan de estudios E de la carrera de Diseño Industrial contiene la disciplina docente Factores Técnicos, en la que el alumno estudia los procesos productivos más importantes, las tecnologías y propiedades básicas de los materiales de mayor uso, como la madera, los metales y los plásticos (ISDi, 2016a).

Sin embargo, el impetuoso desarrollo de la ciencia y la tecnología hace que continuamente surjan nuevos materiales o nuevas prestaciones de materiales ya conocidos. De ahí la necesidad de ampliar el horizonte del estudiantado sobre el mundo de los materiales.

La última asignatura de esta disciplina docente, cuyo nombre es Materiales y Diseño, contribuye a extender esa visión. Sus contenidos abarcan los biomateriales, los materiales inteligentes, los superconductores, los materiales compuestos, los semiconductores y los nanomateriales, entre otros (ISDi, 2016b).

El curso incluye, además, contenidos de diseño sustentable, y maneja dos conceptos claves: el ciclo de vida de un producto y el análisis del ciclo de vida.

2. Análisis del ciclo de vida de un producto

El ciclo de vida de un producto (CVP) consiste en un conjunto de etapas sucesivas por las que transcurre el producto desde que surge hasta que finaliza su vida útil (Capuz y Gómez, 2002).

Este ciclo comienza con la obtención de las materias primas, seguida por la elaboración y transformación de estas, para pasar a la fabricación del producto. Una vez finalizada la etapa de producción, el producto entra consecutivamente en las fases de distribución, consumo/uso y fin de vida. Aquí puede ocurrir su reutilización, iniciando un nuevo ciclo para cumplir otra función, o puede que se recicle o se deseché (figura 2).



Figura 2. Ciclo de vida de un producto.

A lo largo de este proceso se afecta al entorno. A diferencia de los ciclos naturales, que son cerrados y en los que no se perturba el medio, el CVP involucra inevitablemente un impacto ambiental. La metodología para medir ese impacto es el llamado «análisis del ciclo de vida» (ACV) (Capuz y Gómez, 2002).

El ACV, que surgió en los años noventa, se emplea para investigar el impacto ambiental de un producto o un proceso a lo largo del ciclo de vida en cada una de sus etapas.

Las aplicaciones más importantes suelen ser el análisis de la contribución de cada etapa del ciclo de vida a la carga ambiental

general, con el objetivo de su mejoramiento, o la comparación entre productos de diferentes CVP para evaluar sus respectivos impactos ambientales.

Al contar con una evaluación del impacto ambiental por cada etapa del ciclo de vida de un producto o proceso, es posible decidir hacia dónde dirigir las acciones a fin de disminuir la carga total.

Para realizar el ACV existen distintos *software*, como son SimaPro, EcoPro, EcoScan y Ecosoft. Algunos son libres y otros solicitan el pago de licencias. Estos programas permiten la evaluación precisa de los impactos ambientales, ya sea en forma gráfica o mediante los llamados ecopuntos (Capuz y Gómez, 2002).

Estos ecopuntos constituyen una especie de penalización cuando se afecta al medioambiente o se restan si, por el contrario, se beneficia (como es el caso de un producto que al final de su vida útil puede ser reciclado). El resultado del ACV sería un número (de ecopuntos) que permite discernir, según sea alto o bajo, si el impacto ambiental es mayor o menor.

3. Medida del impacto ambiental a partir del ACV

El ACV permite mostrar al estudiante en qué momento del CVP es mayor el impacto ambiental y cuáles son las causas de este. Desde el punto de vista educativo, cualquier discusión adecuada al respecto contribuye a desarrollar una sensibilidad medioambiental en el futuro diseñador.

En cada una de estas etapas, el diseño desempeña un papel muy importante. El diseño sostenible, como respuesta de esta actividad proyectual al desarrollo sostenible, encuentra estrategias para disminuir la carga ambiental en cada una de las etapas del CVP.

Así, se diseña para el reciclaje, de manera que el producto sea fácil de reciclar; se diseña para hacer más eficiente la distribución, utilizando conceptos como la apilabilidad; o se busca que el proceso de producción sea cada vez más limpio y de menos pasos (Capuz y Gómez, 2002).

De igual forma, al escoger el material, una tendencia pertinente es tener en cuenta materiales locales, que sean poco contaminantes o tóxicos, o cuyo proceso de obtención sea de bajo impacto ambiental.

Y en este punto de la obtención del material cabe la pregunta: ¿puede ser ético utilizar en el diseño de un producto un material que sea el resultado de la violencia y la explotación infantil? Como veremos, el

caso del coltán brinda la oportunidad de debatir con los estudiantes en el aula sobre este tema.

4. El coltán

El coltán, conocido como «oro azul u oro gris», debe su nombre a que es una mezcla de dos minerales: columbita y tantalita, de los cuales se extraen niobio y tantalio respectivamente (figura 3). Estos metales de transición constituyen materiales estratégicos al ser decisivos en la fabricación de equipos y dispositivos de alta tecnología (Casas, 2014).

Tanto el niobio como el tantalio fueron descubiertos en el siglo XIX, pero no fue sino hasta el pasado siglo que comenzaron sus aplicaciones a gran escala. La columbita está compuesta por óxido de niobio, hierro y manganeso [(Fe, Mn) Nb₂O₆], y la tantalita, por óxido de tantalio, hierro y manganeso [(Fe, Mn) Ta₂O₆] en variadas proporciones.



Figura 3. Muestra de coltán, el «oro azul».

El niobio se encuentra en el grupo 5 de la tabla periódica con número atómico 41. A temperaturas criogénicas adquiere propiedades superconductoras. Presenta un alto punto de fusión (2 468 °C) y es resistente a la corrosión (Rivero, Martínez y Fernández, 2013).

Estas características hacen que el niobio se utilice en aleaciones para aumentar la fortaleza, así como la resistencia a las temperaturas y a la corrosión. Las superaleaciones de acero con niobio tienen usos especiales en la industria aeroespacial, química, automotriz y en gasoductos.

En forma de alambre aleado con titanio, sirve para construir las bobinas superconductoras que proporcionan los intensos campos magnéticos necesarios para los equipos de resonancia magnética y los aceleradores de partículas.

Otro campo de aplicación es el de las comunicaciones ópticas. El niobato de litio (LiNbO_3) se usa en guías de onda, conmutadores optoelectrónicos y láseres. Este compuesto es clave para poder elaborar redes de fibra óptica más rápidas y eficientes, y disponer de conexiones más rápidas.

El interés de la explotación del coltán es, sobre todo, para poder extraer el tantalio (Sutherland, 2011). El tantalio también pertenece al grupo 5 de la tabla periódica, con número atómico 73. Es muy resistente a la corrosión, por lo cual es muy valorado como sustituto del platino en la instrumentación. También se considera un metal refractario, por su alta temperatura de fusión ($3,017^\circ\text{C}$). Es un excelente conductor de la electricidad y del calor (mejor que el cobre), y muy duro; además de ser casi inoxidable (solo se disuelve empleando ácido fluorhídrico) (Rivero, Martínez y Fernández, 2013). Sin embargo, su «boom» llegó con la telefonía móvil.

Los capacitores electrolíticos de tantalio son totalmente análogos a los más habituales de aluminio. Sin embargo, con el tantalio es factible conseguir una mayor capacidad en un menor tamaño. Gracias a esto se ha conseguido un grado de miniaturización en estos dispositivos que ha posibilitado que existan los teléfonos móviles con las prestaciones y el tamaño que conocemos en la actualidad.

Casi la totalidad de los dispositivos electrónicos actuales incorporan en mayor o menor cantidad capacitores electrolíticos de tantalio, puesto que tienen valores de capacidad más exactos, soportan mayores temperaturas y poseen dimensiones menores que el resto.

También el tantalio se emplea para fabricar resistencias de alta potencia, en superaleaciones empleadas en las turbinas de los aviones o los reactores nucleares, así como para recubrir prótesis humanas. Se trata, por todo ello, de un metal imprescindible para la tecnología moderna, aunque hasta el despegue de la llamada «electrónica personal» no se habían necesitado cantidades masivas.

En cuanto al precio del coltán, durante el año 2000, cuando empezó a cobrar relevancia, varió de 65 euros el kilogramo a 500. En 2017, el precio en los mercados internacionales era de 600 euros el kilogramo (González, 2017).

6. Consecuencias sociales

Si bien el 70 % de la población mundial consume las tecnologías de teléfonos móviles, la gran mayoría desconoce las implicaciones económicas, políticas, ambientales y sociales que se derivan de la extracción del coltán.

La RDC, con una extensión de 2,4 millones de kilómetros cuadrados y unos 70 millones de habitantes, es uno de los países más ricos del mundo en recursos y en biodiversidad; sin embargo, está considerado uno de los países más pobres. Tanto es así que el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) ha clasificado a la RDC como el último país del mundo de acuerdo con el índice de desarrollo humano (González, 2017).

Según el Programa Mundial de Alimentos, en el año 2016 aproximadamente el 63,6 % de la población vivía por debajo del umbral de pobreza y carecía de acceso a recursos para satisfacer sus necesidades básicas; más de 7 millones de personas se hallaban en situación de inseguridad alimentaria y casi la mitad de los niños menores de cinco años padecían malnutrición crónica. En cuanto al nivel de gobernanza, la RDC está considerada como el segundo país peor valorado de todo el continente, por delante exclusivamente de Somalia (González, 2017).

En teoría, el coltán debería de ser un recurso beneficiario para esta región; sin embargo, contrariamente a lo que podría parecer a simple vista, el poseer grandes cantidades de coltán se ha convertido en una desgracia para el Congo. Al coltán se le atribuye el origen de las guerras étnicas de África Central, con más de cinco millones de muertos, la cifra más alta en la historia después de la Segunda Guerra Mundial. Esto ha provocado grandes desplazamientos de población y de refugiados, con las consiguientes consecuencias: hambrunas, enfermedades y violencia. Por su carácter interestatal, estos conflictos se han considerado la Primera Guerra Mundial Africana (Torres, 2014).

Aparentemente, el origen del conflicto bélico son motivos étnicos, pero la ONU no duda en afirmar que este mineral estratégico costea las guerras y es una de sus causas principales. Según informes de agencias internacionales, la exportación de coltán ha financiado a diferentes grupos políticos de la región.

Algunos autores han introducido el concepto de «nuevas guerras» para subrayar el hecho de que no se trata de derrocar al gobierno central, sino que el objetivo es el control económico de pequeñas zonas y poderes locales (González, 2017). Se habla de nuevos centros de autoridad no estatales, donde los grupos rebeldes disfrutan de mayor autoridad, tanto económica como social, que el mismo Estado.

De hecho, Ruanda y Uganda están hoy exportando coltán, mientras que de su suelo no se extrae ni un gramo. Evidentemente lo roban de la RDC y el mineral es trasladado de contrabando a través de las fronteras por milicias de las vecinas Uganda, Burundi y Ruanda.

Este tráfico ilegal y la falta de escrúpulos de algunas empresas dedicadas a la extracción del mineral hacen que, de forma más o menos directa, las multinacionales estén dispuestas a conseguir coltán a cualquier precio. Y no solo de un costo monetario, sino de la vida de personas que mueren extrayendo el mineral o bajo el fuego cruzado de los bandos en conflicto.

El coltán es extraído a través de procesos primitivos similares a como se extraía el oro en California a principios del siglo XIX. Se excavan grandes agujeros en hileras para sacarlo del subsuelo. Los trabajadores entonces echan agua y el lodo formado lo vierten en grandes tubos de lavado, logrando que el metal se deposite en el fondo debido a su mayor peso (figura 5).

Un por ciento significativo de la fuerza de trabajo son mujeres y niños de 10 y 12 años, obligados a trabajar jornadas de 14 horas diarias, en condiciones de explotación y semiesclavitud. Se calcula que por cada kilogramo de coltán han muerto dos o tres niños. Esta realidad trasgrede los derechos humanos a la seguridad y a una vida conforme a la dignidad humana (figura 6).

Por si fuera poco, las mujeres y niñas, además de los trabajos que tienen que realizar en las minas, sufren múltiples abusos y violaciones por parte de los grupos armados, actores y promotores del conflicto (Torres, 2014).



Figura 5. Minas de coltán en la RDC.

La mortalidad infantil asociada a la explotación del coltán en RDC también se explica por la asfixia que sufren los niños al estar a esa profundidad, la desnutrición que presentan y la falta de servicios médicos adecuados. Además, por trabajar en las minas abandonan los estudios.

También se da el caso de niños que se han enlistado, voluntariamente o reclutados a la fuerza, en los grupos armados. Estos niños, generalmente llamados «niños soldados» o «niños guerra», padecen todos los problemas inherentes a los conflictos armados, como el secuestro, asesinato, mutilación y el desarraigo de su comunidad de origen.

Súmese a lo anterior la propagación de enfermedades como el SIDA o de epidemias como el cólera.



Figura 6. Una parte significativa de la fuerza de trabajo en la minería del coltán en la RDC es infantil.

Las condiciones de trabajo infrahumanas son causantes de la alta mortalidad infantil, junto con las enfermedades, la desnutrición y la violencia.

La minería de coltán resulta ser un trabajo bien pagado en la RDC respecto a otros, a pesar de las condiciones descritas. Un obrero del coltán puede conseguir en una semana más de lo que cobra la media en un mes de trabajo. Por supuesto, el nivel de explotación es brutal: un buen trabajador puede producir un kilogramo de coltán en un día, cantidad que se cotiza en el mercado casi cien veces más de lo que cobra a la semana.

Debido a la dificultad de distinguir entre la explotación legítima y la ilegítima, algunos fabricantes de aparatos electrónicos han decidido,

por motivos éticos, dejar de lado esta zona del mundo como fuente de coltán y dirigirse a otras fuentes.

Por todo esto, muchas veces se alude al coltán como un «material ensangrentado» (*bloody mineral*) y a los teléfonos que pueden llevar tantalio extraído del coltán de la RDC, como «móviles de sangre» o «manchados de sangre».

7. Impacto ambiental

El proceso de extracción del coltán trae consigo altos impactos ambientales, que se inician con la remoción de la cubierta vegetal. La gravedad de este proceso radica en que el Congo alberga, después del Amazonas, el segundo pulmón más grande del mundo, con 100 millones de hectáreas de selva, y el 70 % del agua dulce de África. Según Greenpeace, los bosques de África Central retienen el 8 % del carbono almacenado en el planeta, por lo que su eliminación liberaría unos 34 400 millones de toneladas de dióxido de carbón, 65 veces las emisiones de un país como España en un año (Bollero, 2009).

Pero la deforestación no es solo para acceder a los yacimientos, sino para aprovechar la madera con vistas a construir albergues para los mineros, usar la leña para cocinar y calentar, utilizar la corteza para fabricar las bandejas con las que se lava el coltán y las lianas para transportarlo (Durán *et al.*, 2018).

A consecuencia del cambio de uso del suelo, la fauna local de especies protegidas se ve seriamente afectada debido a la pérdida de su hábitat. Las excavaciones indiscriminadas han ocasionado daños irreparables al ecosistema.

Por ejemplo, se estima que la población de elefantes ha disminuido un 80 % en los últimos 50 años. Muchos mueren a manos de los soldados que los matan para comerciar con el marfil y vender o consumir su carne.

Lo mismo ha sucedido con los gorilas, ya que varios parques nacionales se encuentran en la zona de conflicto, por lo que su población ha descendido un alarmante 90 %. Las causas son la escasez de comida y la caza furtiva para alimentar a los mineros, lo cual pone a esta especie en peligro de extinción (figura 7).

Hay que destacar, además, el abandono de las tierras de cultivo y de los animales domésticos por parte de la población para concentrarse en la minería de coltán, mejor remunerada.



Figura 7. Masacre de gorilas en la región del Kivu, la zona de conflicto por el coltán.

8. Un seminario sobre el coltán

La asignatura Materiales y Diseño contempla la realización de diez horas dedicadas a conferencias por parte del profesor, y las doce horas restantes se destinan a seis clases de seminario. En estas los estudiantes desarrollan sus ponencias sobre temas relacionados con los materiales, como pueden ser el bambú, las cerámicas avanzadas o los electretos. Y entre estos temas se encuentra el coltán.

Debatir en el aula los conflictos relacionados con la obtención del coltán permite contribuir a desarrollar valores como el humanismo, la justicia y la responsabilidad. Estos valores forman parte de aquellos en los que el Ministerio de Educación Superior (MES, 2016) de Cuba propone centrar la atención.

El humanismo supone apropiarse de una concepción de la sociedad centrada en la dignidad plena de las personas, la generosidad, la solidaridad y el altruismo. La justicia se identifica con la igualdad social, que se expresa en que los seres humanos sean acreedores de los mismos derechos y oportunidades para su desarrollo, sin discriminación por diferencias de origen, edad, sexo, desarrollo cultural, color de la piel y credo. La responsabilidad se basa en el cumplimiento consciente del deber individual y social.

La minería del coltán constituye una flagrante violación de los derechos humanos, esto toca de cerca el humanismo de quien

conoce esa realidad (figura 8). Encierra además una gran injusticia como antivalor del que se desea formar en nuestros estudiantes. Al mismo tiempo, plantea un problema ético, al poner sobre el tapete la responsabilidad del diseñador, del fabricante y del consumidor (Zito, 2014; Taffel, 2015).

En efecto, los intereses comerciales son tan fuertes que hasta la fecha todas las medidas han quedado en papel mojado. El papel del sector privado en la explotación de los recursos naturales y en la continuidad de la guerra ha sido determinante. Algunas compañías han estado implicadas y han impulsado la guerra directamente, mientras que otras han facilitado el acceso a recursos financieros que han sido empleados para la compra de armas. El Consejo de Seguridad de la ONU llegó a establecer un embargo a la importación y exportación de recursos ligados a estas actividades, so pena de sanciones que, en definitiva, nunca se han aplicado (Bollero, 2009).

Algunas empresas fabricantes de teléfonos celulares han sido acusadas de que utilizan coltán proveniente de la RDC en sus productos. Otras han declarado que su producción se basa en tantalio de otros yacimientos, que sus proveedores son confiables y declaran metafóricamente que sus móviles no están «manchados de sangre». Sin embargo, hay muchas dudas al respecto, por la consabida falta de escrúpulos que prevalece frente a la posibilidad de obtener ganancias.

Se precisa, entonces, una postura de consumo responsable frente al consumismo desmedido, una ética como ciudadanos y diseñadores a favor del desarrollo sostenible (Zito, 2014).

De igual modo, se destaca la terrible contradicción de que la RDC, siendo unos de los países con más recursos naturales, es uno de los más pobres del mundo, por la falta de control estatal sobre sus riquezas naturales.

Resulta de interés subrayar que en la revisión bibliográfica realizada se encontró que una idea similar se desarrolla en varias escuelas de secundaria básica en España, al abordar los problemas socioambientales asociados a la gestión de recursos minerales, tomando de ejemplo el caso del coltán (Rivero, Martínez y Fernández, 2013).

En nuestra experiencia, los estudiantes se sensibilizan con esta situación, inconcebible a estas alturas del siglo XXI.



Figura 8. La minería del coltán en la RDC, una flagrante violación de los derechos humanos.

Conclusiones

A partir del CVP el estudiante se relaciona con aquellas etapas que tienen mayor impacto negativo en el entorno, a la vez que se establecen las posibles soluciones, desde el punto de vista del diseño, para mitigar tal carga.

En particular, al debatir en clases la etapa de obtención del material, el caso del coltán posibilita profundizar en valores como el humanismo, la justicia y la responsabilidad. Esto representa una buena oportunidad de contribuir a la formación de valores en el estudiantado.

Para el alumno resulta impactante comprobar que, a pesar de las implicaciones sociales y ambientales que ha tenido la explotación ilegal del coltán, los esfuerzos de los actores internacionales han sido insuficientes, debido a que prima el beneficio que trae la minería a bajo costo, representada en condiciones laborales precarias y ausencia de regulación.

De ahí que la posición que la asignatura Materiales y Diseño trasmite a los estudiantes es que resulta éticamente incorrecto utilizar en un proyecto de diseño un material que, como el tantalio extraído del coltán de la RDC, es el resultado de la explotación infantil, la injusticia y las guerras.

Bibliografía

- BOLLERO, D. (2009): «Coltán, el futuro insostenible», *Público*, <<http://www.publico.es/ciencias/coltan-futuro-insostenible.html>> [10/12/2018].
- CASAS, S. (2014): «Coltán, oro azul», *Universo de la Tecnología*, año VII, n.º 19, agosto-diciembre.

- CAPUZ, S. y T. GÓMEZ (2002) (eds.): *Ecodiseño. Ingeniería del ciclo de vida para el desarrollo de productos sostenibles*, Universidad Politécnica de Valencia.
- DURÁN, M.; M. COCERA, A. SALCINES y A. DÍAZ (2018): «Impactos ambientales y sociales del coltán», <https://www.researchgate.net/publication/328065344_IMPACTOS_AMBIENTALES_Y_SOCIALES_DEL_COLTAN> [10/12/2018].
- FRESNO, C. (2017): *La formación de valores. Reto del siglo XXI*, La Habana: Editorial Universitaria. ISBN: 978-959-16-1458-2.
- GONZÁLEZ, I. (2017): «El conflicto del coltán en la República Democrática del Congo», tesis de diploma, Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales, Universidad de León, España.
- INSTITUTO SUPERIOR DE DISEÑO (ISDI) (2016a): «Plan de estudio E. Carrera de Diseño Industrial», La Habana.
- INSTITUTO SUPERIOR DE DISEÑO (ISDI) (2016b): «Programa de la asignatura Materiales y Diseño. Carrera de Diseño Industrial», La Habana.
- MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR (MES) (2016): «Planificación estratégica y objetivos de trabajo 2017-2021», La Habana.
- PÉREZ, M. y A. BERAZAÍN (2006): «Curso de Diseño Sustentable: una experiencia en el ISDi», en J. Mendoza y M. A. Fernández (eds.), *Educación enerxética e o desenvolvemento sostible*, Universidad de Santiago de Compostela, pp. 523-530. ISBN 84-9750-627-8.
- RIVERO, G. F.; G. MARTÍNEZ y E. FERNÁNDEZ (2013): «Piensa y actúa local. Coltán y residuos electrónicos en la enseñanza de problemas socioambientales asociados a la gestión de recursos minerales», *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, vol. 21, pp. 1-59.
- SUTHERLAND, E. (2011): «Coltan, the Congo and your Cell Phone. The Connection between your Mobile Phone and Human Rights Abuses in Africa», <<https://web.mit.edu/12.000/www/m2016/pdf/coltan.pdf>> [10/12/2018].
- TAFFEL, S. (2015): «Towards an Ethical Electronics? Ecologies of Congolese Conflict Minerals», *Westminster Papers in Culture and Communication*, vol. 10, n.º 1, pp. 18-33.
- TORRES, A. M. (2014): *El coltán, recurso geoestratégico del Congo*, Facultad de Relaciones Internacionales, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá.
- ZITO, M. (2014): «La ética del diseño sustentable», *Cuaderno 48*, Centro de Estudios en Diseño y Comunicación, Universidad de Palermo, pp. 95-105.



Las prácticas de laboratorio de Física asistidas por computadoras. Experiencias y proyecciones para una contribución más efectiva a la formación del profesional

ARCELIO HERNÁNDEZ FERREIRA,* OTHMAN ESPINOSA
VALDÉS,* GIRALDO JIMÉNEZ CHAPPOTIN**

Introducción

Desde hace más de tres décadas se ha venido manifestando como una tendencia en la formación de los ingenieros que la contribución de la Física no se agota con la formación del cuadro físico del universo que presupone la comprensión de diversos fenómenos que se dan en la naturaleza o la fundamentación de la tecnología del mundo contemporáneo, sino que debe incidir al mismo tiempo en el desarrollo de las habilidades profesionales que tipifican los modos de actuación del ingeniero (Álvarez de Zayas, 1986).

Por otra parte, cada día es más frecuente en el entorno de trabajo de los ingenieros el empleo de los sistemas automatizados para el control de los procesos tecnológicos. Estos se caracterizan por el uso de sensores para la medición de magnitudes que determinan los parámetros tecnológicos de los procesos y el procesamiento de sus señales con *software* especializados que brindan la información necesaria para la oportuna y certera toma de decisiones.

La introducción de tales sistemas en las prácticas de laboratorio de las asignaturas básicas (como la Física) desde los primeros semestres, haría una contribución sustancial al desarrollo de esas habilidades profesionales de los ingenieros.

Las prácticas de laboratorio asistidas por computadoras son el resultado de un proceso de evolución de las mediciones de las magnitudes

* Departamento de Física, Facultad de Ingeniería, Universidad de Cienfuegos, Cuba.

** Departamento de Ciencias Básicas, Facultad de Ingeniería y Administración, Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, Colombia.

físicas producto del desarrollo tecnológico y han implicado un cambio sustancial, incluso en lo que se entiende por «realizar una medición». Se pueden identificar al menos tres etapas asociadas con la evolución de los instrumentos de medición:

- Etapa de los instrumentos analógicos, con indicadores de aguja, varias escalas con sensibilidades distintas, impedancias de entrada no siempre altas y clases de acuerdo a su calidad, etc.
- Etapa de los instrumentos digitales. En gran parte resuelve el problema de la impedancia de entrada y la estimación en las mediciones. Algunos aún conservan las escalas múltiples, pero la precisión de cada una se autoestablece. Varios fabricantes brindan la posibilidad de conexión a una computadora para efectuar mediciones y otras operaciones desde esta.
- Etapa del uso de los sensores, el desarrollo de interfaces para adecuación de las señales y su conexión a la computadora. Desarrollo de *software* para la adquisición y procesamiento de los datos adquiridos de los sensores en la forma requerida.

En las prácticas de laboratorio asistidas por computadoras los sensores de medición se intercalan en los montajes experimentales para efectuar las mediciones de las magnitudes físicas necesarias, se conectan a la computadora a través de una interfaz que realiza la adecuación de la señal proveniente del sensor. En la computadora se ejecuta un programa que conduce el proceso de efectuar las mediciones y finalmente las procesa y presenta en la forma conveniente. Todo esto está debidamente integrado en un sistema.

Los sistemas asistidos por computadoras trajeron una significativa simplificación de todo el proceso de realización de las mediciones y su procesamiento, y de forma general han aumentado la exactitud y precisión de las mediciones. Sin embargo, en la mayoría de los casos las prácticas de laboratorio asistidas por computadoras propuestas por los fabricantes de equipos de laboratorio requieren ser modificadas para atemperarlas a nuevas exigencias del proceso de aprendizaje. Como una regularidad, se observa que al ejecutar los mencionados montajes lo que se ha conseguido es acomodar a los estudiantes: estos siguen una rutina de pasos (a la que se ha reducido el proceso de medición) y, al analizar los resultados, llegan a las mismas conclusiones que cuando la práctica

se hacía de forma manual y reiteran los mismos niveles de conocimiento del nivel de enseñanza precedente.

Creemos necesario modificar las habilidades a desarrollar durante las prácticas de laboratorios asistidas por computadoras. A diferencia de las prácticas convencionales, en el énfasis no debe estar en las habilidades experimentales y la manipulación de instrumentos de medición (que apenas se hace), sino en el desarrollo de otras habilidades intelectuales como el análisis, la inducción, la generalización, la síntesis, etc. A la par, se contribuye a una habilidad profesional específica relacionada con el uso de este tipo de sistema por los ingenieros en entornos productivos.

En nuestro trabajo ampliamos las posibilidades del sistema HPCI-1 que poseen las universidades a partir de:

- Modificar los trabajos de laboratorio de tipo cualitativo planteados por los fabricantes, de forma que pudieran incluir cálculos cuantitativos.
- Introducir nuevos trabajos de laboratorio con el uso de los elementos de los circuitos que posee, complementándolos con algunos elementos o equipos del laboratorio.
- Diseñar nuevos trabajos de laboratorio con el uso de otros equipos existentes en los laboratorios de Física, pero usando las facilidades de algún trabajo previsto en el sistema HPCI-1.

De esta forma nos aproximamos al objetivo de hacerlos más eficiente en la formación profesional del ingeniero.

1. Materiales y métodos

Dados los objetivos propuestos, el trabajo está concebido a partir del uso del sistema asistido por computadoras HPCI-1 (U-Star Sensor Technology Co., Ltd., 2004a; 2004b), adquirido por el Ministerio de Educación Superior de Cuba para las universidades, que se complementa con algunos otros equipos del laboratorio. Se efectuó un análisis profundo de las posibilidades del sistema a partir del estudio de los manuales que lo acompañaban y de la realización de los trabajos conforme a estos. En el cuadro 1 aparecen los equipos y accesorios adicionados al sistema HPCI-1 para cada una de las prácticas que fueron modificadas.

Cuadro 1. Equipos u accesorios adicionados al HPCI-1

PRÁCTICA DE LABORATORIO	EQUIPOS O ACCESORIOS ADICIONADOS AL HPCI-1
Ley de Boyle	Fuelle metálico de volumen variable, recipiente para contenerlo y termómetro.
Oscilaciones electromagnéticas, versión 1	Cajas decádicas de resistencias y condensadores, bobinas solenoides.
Choques en una dimensión	Imanes permanentes y plastilina.
Momento de inercia	Equipo inutilizado por rotura del contador de tiempo.
Ondas sonoras estacionarias	Equipo completo para obtener ondas sonoras estacionarias.
Estudio de circuitos de CA	Generador de señales, cajas decádica de resistencias y condensadores.
Constante de Planck con ledes	Diodos ledes transparentes de diferentes longitudes de onda, espectrómetro de red, fuente DC.
Oscilaciones electromagnéticas, versión 2	Caja decádica de resistencias.
Isocronismo del péndulo simple	Cubeta plástica transparente con electrodos.
Determinación de la aceleración gravitatoria con el péndulo	Hilos casi inextensibles de densidad lineal de masa muy pequeña.
Segunda ley de Newton	Hilo casi inextensible de densidad lineal de masa despreciable.

Se empleó la hoja de cálculo Excel de Microsoft para la elaboración de las gráficas y el procesamiento de los resultados experimentales.

2. Resultados y discusión

Como resultado del trabajo se implementaron nuevos montajes que permiten verificar experimentalmente fenómenos y leyes que antes no se podían mostrar y, de esta manera, se ha ampliado la cobertura que brindan las prácticas a los programas de las asignaturas, tanto en el sistema de conocimientos como en el de habilidades (Horruitiner Silva, 1985; Fuentes González, 1989). En el proceso de incorporación del nuevo equipamiento se priorizaron aquellos dedicados a contenidos que no tenían un soporte experimental o que era factible mejorar. La relación de las prácticas perfeccionadas es la siguiente:

1. Estudio de las oscilaciones electromagnéticas libres en el circuito RLC: un tratamiento que combina mediciones experimentales y cálculos computarizados. En esta ocasión se empleó la plataforma general de mediciones del HPCI-1 con los sensores conectados a elementos circuitales existente en el laboratorio y el lenguaje de programación MatLab. Se pudieron mostrar los tres casos de amortiguamiento y verificar las condiciones

para la ocurrencia de estos, cuestión casi nunca tratada en el laboratorio y poco en las clases teóricas.

2. Implementación de una práctica de laboratorio sobre conservación de la cantidad de movimiento lineal durante los choques unidimensionales. Se verificó experimentalmente la conservación de la cantidad de movimiento lineal durante los choques elásticos e inelásticos, así como la conservación de la energía cinética durante los choques elásticos y su no conservación durante los inelásticos. Los resultados obtenidos, al compararlos con los previstos teóricamente, son muy buenos. A su vez, los resultados de esta práctica, al compararlos con los de otra similar realizada con contadores para medir las velocidades, son mucho mejores.
3. Recuperación de un equipo de laboratorio para la determinación del momento de inercia (Hernández Ferreira y Hernández Gessa, 2011). Se buscó una alternativa para realizar las mediciones de tiempo del movimiento en un conjunto perteneciente a un equipo discontinuado usando el sistema HPCI-1. Los resultados fueron muy satisfactorios y de esta manera disponemos de dos equipos con principios diferentes para el mismo propósito.
4. Implementación de una práctica de laboratorio sobre dinámica de la partícula. En este caso el montaje permite verificar la segunda ley de Newton del movimiento a partir de mostrar la relación lineal entre los elementos de la ecuación fundamental de la dinámica de la traslación. Se realizó un procesamiento alternativo al propuesto por los fabricantes. Los resultados son muy convincentes.
5. Implementación de una práctica de laboratorio para el estudio de las ondas estacionarias. Se retoma un montaje dedicado al estudio de las ondas mecánicas y, en particular, de las ondas estacionarias para medir la velocidad del sonido en el aire. Se introducen elementos para, mediante un sensor acústico, poder determinar con mayor precisión la ubicación de los nodos y antinodos de dicha onda. Los resultados fueron excelentes.
6. Implementación de una práctica de laboratorio para determinar la constante de Planck usando la luminiscencia por inyección en diodos emisores de luz. Se trata de una alternativa a la práctica sobre efecto fotoeléctrico externo para hallar h . Se hace uso de las facilidades del HPCI-1 en la construcción de características I-V de dispositivos, en este caso de diodos led, y se combina con la medición de la longitud de onda emitida por estos en un

espectrómetro. Los resultados se compararon incluso con los obtenidos en un equipo profesional y son muy buenos (Hernández Ferreira y Borgiano Mikulenko, 2017).

7. Comprobación experimental de la ley de Boyle para los gases. Se combinaron elementos de un montaje proveniente de la URSS y los sensores de presión del sistema HPCI-1 (figura 1a). Se pudo verificar el cumplimiento de la ley de Boyle e incluso para cuáles condiciones de temperatura y presión los resultados obtenidos para el aire como gas real empiezan a desviarse del comportamiento ideal (figura 1b). El número de mediciones efectuado fue muy superior al previsto en el montaje del sistema HPCI-1 y se pudo variar la temperatura del ensayo.

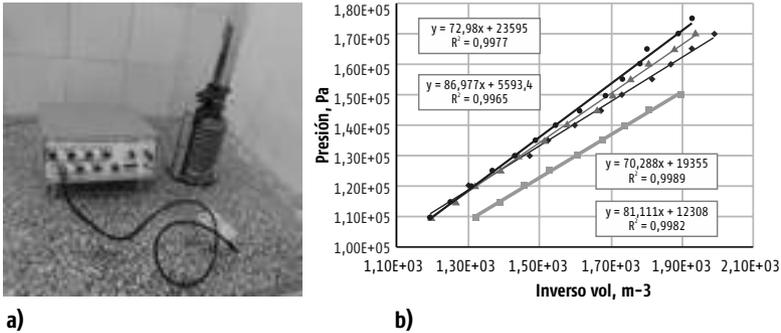


Figura 1. a. Aspecto del montaje para la comprobación de la ley de Boyle, que muestra el fuelle metálico y el sensor de presión conectado a la interfaz. b. Gráficas de la dependencia lineal de la presión respecto al inverso del volumen a temperatura constante para el aire.

8. Tratamiento combinado de mediciones experimentales y cálculos computarizados para el estudio de las oscilaciones electromagnéticas libres en el circuito RLC (Hernández Ferreira y Espinosa Valdés, 2018). Aquí se empleó un trabajo previsto en el manual del HPCI-1 con el circuito propuesto para el caso inframortiguado, pero se le adicionó una caja de resistencias decádica para obtener los otros dos casos de amortiguamiento. Se pudo obtener el valor de la inductancia y la resistencia de la bobina y, con el valor de la capacidad del condensador, verificar las condiciones de los tres casos de amortiguamiento (figura 2). En este caso se usó el lenguaje de programación Wolfram Mathematica para los cálculos computarizados.

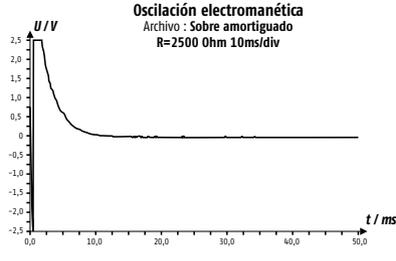
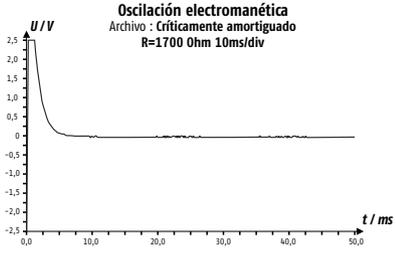
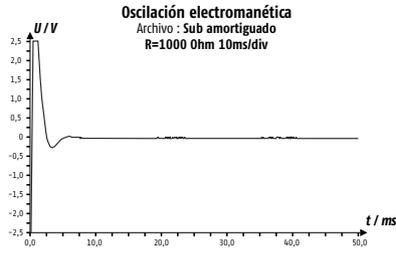
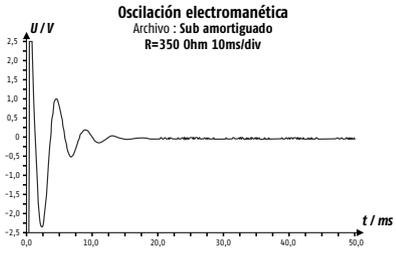
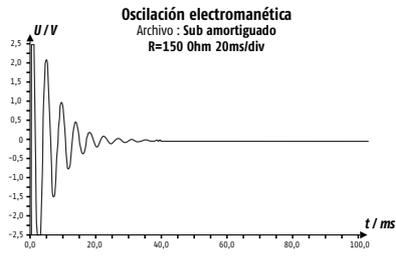
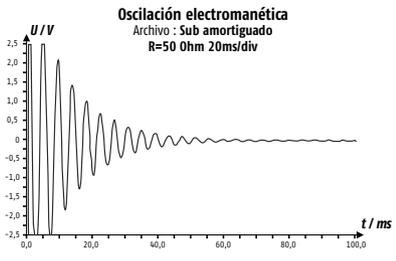
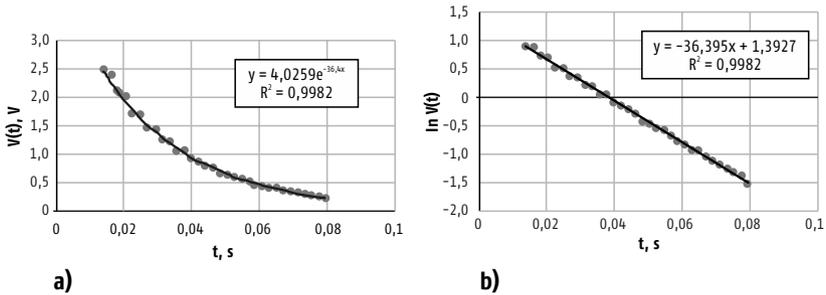


Figura 2. Gráfica del ploteo de los valores del voltaje en el condensador (a) y de su logaritmo natural (b) para diferentes instantes del tiempo en el caso inframortiguado. Las seis figuras restantes muestran el registro del voltaje en el condensador con el tiempo al variar la resistencia del circuito RLC. Las cuatro primeras corresponden al caso inframortiguado y se evidencia el roceso de desaparición de las oscilaciones al aumentar la resistencia. La quinta corresponde al caso críticamente amortiguado y la sexta al caso sobreamortiguado.

9. Ampliación en el uso del Laboratorio de Física Asistido por Computadora HPCI-1 para el estudio de circuitos de corriente alterna. En este caso se hacen mediciones cuantitativas del desfase introducido por elementos capacitivos e inductivos en circuitos de corriente alterna, primero por separado y luego integrados, para ilustrar las características de este desfase con la prevalencia de uno u otro (figura 3). Finalmente, se muestra el fenómeno de la resonancia de corriente, de gran importancia práctica (Hernández Ferreira, 2017).

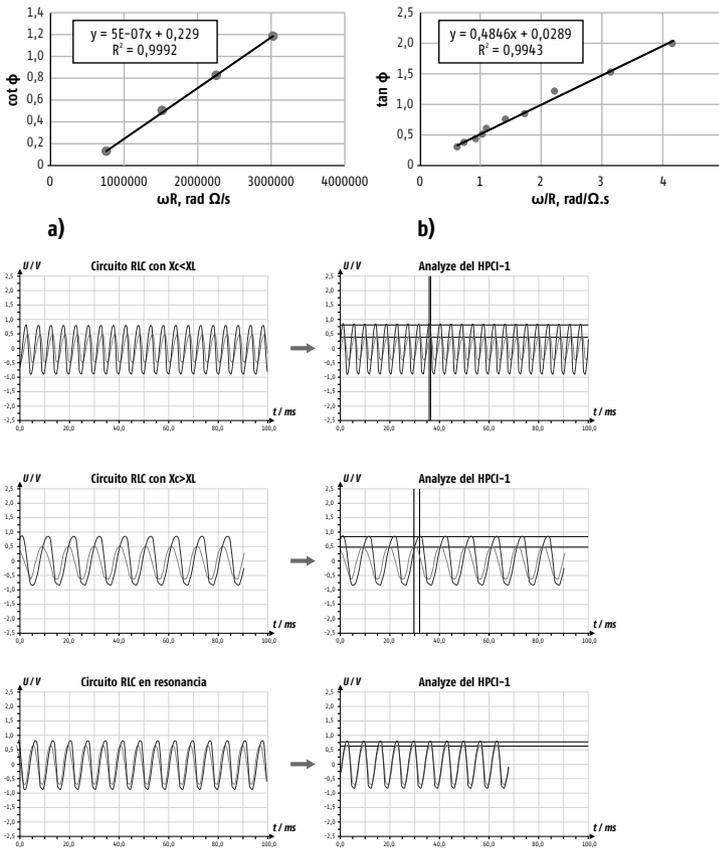


Figura 3. a. Gráfica de la cotangente del ángulo de desfase contra ω/R para el circuito RC. b. Gráfica de la tangente del ángulo de desfase contra ω/R para el circuito RL. Las seis gráficas restantes que aparecen debajo muestran los voltajes de la fuente y de la resistencia para los casos en que hay predominio de efectos inductivos, capacitivos y balance entre ellos (a la izquierda), y las mediciones del desfase entre ambas señales con la herramienta Analyze del HPCI-1 para dichos casos (a la derecha).

10. Registro eléctrico de las oscilaciones mecánicas, ventajas para el estudio de los casos más generales. A partir de un trabajo previsto en el manual del HPCI-1 se obtuvieron los registros de las variaciones del potencial eléctrico con el tiempo correspondientes a las posiciones de los cuerpos integrantes de tres péndulos simples que poseían diferentes masas. Se procesaron los valores de las amplitudes en los diferentes instantes de tiempo, de dichos datos se obtuvieron los coeficientes de amortiguamiento de las esferas para el aire y se evidenció la influencia de la masa de los cuerpos en este. Con la variante empleada, el trabajo de laboratorio va más allá del estudio tradicional restringido a las oscilaciones armónicas sin presencia de fuerzas de fricción (Hernández Ferreira y Espinosa Valdés, 2018). Este trabajo prepara al estudiante para realizar futuras prácticas de laboratorio referidos a otros tipos de oscilaciones, como las electromagnéticas.
11. La evolución de los instrumentos de medición de las magnitudes físicas y su influencia en los resultados de las prácticas de laboratorio de Física. Caso del péndulo simple. Con este trabajo se evidencia, y de esta manera se justifica, el uso de los sistemas asistidos por computadoras en las prácticas de Física. A través del estudio del péndulo simple se demuestra el aumento de la exactitud y precisión de los resultados cuando las mediciones se hacen con tales facilidades (Hernández Ferreira y Pérez Roque, 2018).
12. Propuesta para la práctica de laboratorio «Estudio del péndulo simple» usando un sistema asistido por computadora. Se fundamenta la propuesta de un montaje en el cual se realizan las mediciones y el procesamiento para tres sistemas que difieren en su masa y se pide el análisis de los resultados y su discusión a la luz de casos más generales de oscilación que no corresponden solo con el armónico simple. Se ilustran las posibilidades de desarrollar nuevas habilidades intelectuales en los estudiantes.

En todos los casos se eleva la precisión con que se determinan las magnitudes necesarias para obtener los resultados previstos en las prácticas. A manera de resumen, en la tabla 1 se muestran los resultados obtenidos para 10 de los montajes. Las incertidumbres relativas de las magnitudes a determinar experimentalmente resultan bajas comparadas con los

valores teóricos de referencia. De igual manera, en los casos de dependencias lineales los valores de los coeficientes R^2 del ajuste por el método de los mínimos cuadrados eran siempre muy cercanos a 1.

Tabla 1. Resultados experimentales obtenidos para diez de los montajes

TÍTULO DE LA PRÁCTICA	COEFICIENTE R^2	COEFICIENTE DE AMORTIGUAMIENTO	
Registro eléctrico de las oscilaciones mecánicas	0,992	0,0061 (esfera acero)	
	0,9839	0,0088 (esfera aluminio)	
	0,9837	0,034 (esfera madera)	
TÍTULO DE LA PRÁCTICA	COEFICIENTE R^2	ERROR RELATIVO	VALOR DE LA ACCELERACIÓN GRAVITATORIA
Estudio del péndulo simple. Influencia de los instrumentos de medición	0,991	2,1 %	9,99 m/ s ² (analógico)
	0,9979	1,0 %	9,88 m/ s ² (digital)
	0,9996	0,0078 %	9,78 m/ s ² (interfaz)
TÍTULO DE LA PRÁCTICA	ERROR RELATIVO	VELOCIDAD DEL SONIDO	
Estudio de ondas sonoras estacionarias	2,3 %	340,10 m/s	
TÍTULO DE LA PRÁCTICA	CASO ESTUDIADO	ERROR ABSOLUTO	
Conservación de la cantidad de movimiento lineal durante los choques unidimensionales	Choque plástico, un cuerpo en reposo y otro en movimiento de diferentes masas	0,0048	
	Choque plástico, un cuerpo en reposo y otro en movimiento de igual masa	0,0043	
	Choque elástico, un cuerpo en reposo y otro en movimiento de igual masa	0,0018	
	Choque elástico, un cuerpo en reposo y otro en movimiento de igual masa	0,0035	
	Choque plástico, un cuerpo en reposo y otro en movimiento de igual masa	0,0028	
	Choque elástico, un cuerpo en reposo y otro en movimiento de diferentes masas	0,0021	
	Choque elástico, ambos cuerpos en movimiento a su encuentro de igual masa	0,0024	
TÍTULO DE LA PRÁCTICA	COEFICIENTE R^2	MASA DEL CUERPO	
Dinámica de la partícula. Verificación de la segunda ley de Newton	0,999	0,649	
	0,985	0,215	
TÍTULO DE LA PRÁCTICA	CASO ESTUDIADO	MOMENTO DE INERCIA	ERROR RELATIVO
Determinación del momento de inercia	Dos varillas y dos pesas	0,02330 kg x m ²	10,66
	Cuatro varillas y cuatro pesas	0,04120 kg x m ²	0,45

Tabla 2. Resultados experimentales obtenidos para diez de los montajes (cont.)

TÍTULO DE LA PRÁCTICA	VALOR EXPERIMENTAL DE LA RESISTENCIA QUE CONDUCE AL CASO CRÍTICO	ERROR RELATIVO	
Circuito RLC. Versión 1	77 Ω	5,2 %	
TÍTULO DE LA PRÁCTICA	COEFICIENTE R ²	COEFICIENTE DE AMORTIGUAMIENTO	
Oscilaciones libre circuito RLC. Versión 2	0,9982	36,4	
	Valor experimental de la resistencia que conduce al caso crítico	Error relativo	
	1 700 Ω	3,6 %	
TÍTULO DE LA PRÁCTICA	VALOR DE LA CONSTANTE DE PLANCK	ERROR RELATIVO	COEFICIENTE R ²
Constante de Planck con ledes	7,0x10 ⁻³⁴ J x s	5,2 %	0,9804
TÍTULO DE LA PRÁCTICA	VALORES DE LA CAPACIDAD Y LA INDUCTANCIA	COEFICIENTE R ²	
Ampliación del uso del HPCI-1 para estudio de circuitos de CA	0,5 μ F	0,9992	
	0,485 mH	0,9943	

Conclusiones

Resulta necesario que las prácticas de laboratorio asistidas por computadoras propuestas por los fabricantes de equipos sean remodeladas para que sean eficaces en la formación profesional de los ingenieros.

Las prácticas propuestas permiten ir más allá en el conocimiento y las habilidades de los estudiantes y superar el nivel de asimilación con respecto a la enseñanza precedente.

Es necesario modificar el énfasis, que no debe estar en las habilidades experimentales y la manipulación de instrumentos de medición, sino en el desarrollo de otras habilidades intelectuales como el análisis, la inducción, la generalización, la síntesis, etc., a la vez que se contribuye a desarrollar una habilidad profesional específica relacionada precisamente con el uso de este tipo de sistema por los ingenieros en entornos productivos.

Bibliografía

- ÁLVAREZ DE ZAYAS, C. M. (1986): «Tendencias en la Enseñanza de la Física para ingenieros en Cuba», *Revista Cubana de Educación Superior*, vol. 5, n.º 1, La Habana, pp. 29-38.
- FUENTES GONZÁLEZ, H. C. (1989): «Perfeccionamiento del sistema de habilidades en la disciplina Física para estudiantes de Ciencias Técnicas», tesis

- de doctorado en Ciencias Pedagógicas, Instituto Superior Politécnico Julio Antonio Mella (ISPJAM), Santiago de Cuba.
- HERNÁNDEZ FERREIRA, A. (2017): «Ampliación en el uso del Laboratorio de Física Asistido por Computadora HPCI-1 para el estudio de circuitos de corriente alterna», en *Memorias del IV Taller de Enseñanza de la Física*, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba. ISBN 978-959-282-099-9.
- HERNÁNDEZ FERREIRA, A. y A. HERNÁNDEZ GESSA (2011): «Evaluación de tres montajes experimentales para la práctica de laboratorio “Momento de inercia de un cuerpo rígido”», *Latin-American Journal of Physics and Education*, vol. 5, n.º 1, marzo, pp. 183-191.
- HERNÁNDEZ FERREIRA, A. y N. BORGIANO MIKULENKO (2017): «Implementación de una práctica de laboratorio para determinar la constante de Planck usando la luminiscencia por inyección en diodos emisores de luz», en *Memorias del IV Taller de Enseñanza de la Física*, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba. ISBN 978-959-282-099-9.
- HERNÁNDEZ FERREIRA, A. y G. PÉREZ ROQUE (2018): «La evolución de los instrumentos de medición de las magnitudes físicas y su influencia en la modalidad y resultados de las prácticas de laboratorio de Física. Caso del péndulo simple», en *Memorias del V Taller de Enseñanza de la Física*, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba. ISBN 978-959-207-618-1.
- HERNÁNDEZ FERREIRA, A. y O. ESPINOSA VALDÉS (2018): «Registro eléctrico de las oscilaciones mecánicas, ventajas para el estudio de los casos más generales», en *Memorias del V Taller de Enseñanza de la Física*, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba. ISBN 978-959-207-618-1.
- HERNÁNDEZ FERREIRA, A. y O. ESPINOSA VALDÉS (2018): «Tratamiento combinado de mediciones experimentales y cálculos computarizados para el estudio de las oscilaciones electromagnéticas libres en el circuito RLC», *Latin-American Journal of Physics and Education*, vol. 12, n.º 3, septiembre, pp. 3304-1-3304-7.
- HORRUITINER SILVA, P. (1985): «El perfeccionamiento en el sistema de conocimientos en la disciplina Física para estudiantes de Ingeniería», tesis de doctorado en Ciencias Pedagógicas, ISPJAM, Santiago de Cuba.
- U-Star Sensor Technology Co., Ltd. (2004a): «HPCI-1 Computer Aided Physics Laboratory. Application Manual. Version 4.0», Shanghái.
- U-Star Sensor Technology Co., Ltd. (2004b): «HPCI-1 Computer Aided Physics Laboratory. Experiment Manual. Version 4.0», Shanghái.



La implementación de la realidad aumentada como generadora de nuevas formas de comprensión en electricidad y magnetismo

BLANCA PAOLA AVILA CERVANTES,* JAVIER ENRIQUE LÓPEZ MORALES,** ARLETH ALEJANDRA OLIVARES CANALES,* JUAN ANDRÉS VELÁZQUEZ ESTEVES,* GABRIELLA PICCINELLI BOCCHI*

Introducción

Alumnos de las carreras de Pedagogía e Ingeniería en Computación (ICO) y la doctora Gabriella Piccinelli, de la Facultad de Estudios Superiores Aragón, de la Universidad Nacional Autónoma de México, conformamos un grupo de trabajo y nos dimos a la tarea de comenzar una investigación acerca de la implementación de la realidad aumentada (RA) en clases de Electricidad y Magnetismo (EyM) en la carrera de ICO en la FES Aragón.

Consideramos de gran importancia integrar nuevas tecnologías al espacio educativo, que fomenten el interés por aprender y permitan crear nuevas formas de acercarse a los contenidos, de manera más atractiva para los estudiantes, y que puedan ser enriquecedoras en su preparación como futuros profesionales.

Debido a distintas dificultades y necesidades presentes en la materia de Electricidad y Magnetismo (EyM), nos interesa integrar la RA como herramienta educativa. La tecnología servirá como un elemento mediador entre el conocimiento y la construcción del aprendizaje. La RA propicia la materialización del proceso de aprendizaje, la inmersión del aprendiz en un contexto de información más tangible, que

* Facultad de Estudios Superiores Aragón, Universidad Nacional Autónoma de México, México D. F.

** Centro Tecnológico Aragón, Facultad de Estudios Superiores Aragón, Universidad Nacional Autónoma de México, México D. F.

permite intensificar las relaciones entre teoría y aplicación práctica («EduTrends: realidad aumentada y virtual», 2017, p. 16).

El principal objetivo del proyecto es que el alumno comprenda mejor las ecuaciones de Maxwell, en particular la ley de Gauss, con ayuda de la RA. Dentro del grupo de trabajo, nos enfocamos en cuidar el proceso didáctico, debido a que se integrará un nuevo material durante las clases (RA), y en entender qué factores de su uso pueden influir en la comprensión de los temas.

Un objetivo de esta investigación es realizar una secuencia didáctica, que ayudará al docente a comprender la utilidad de la RA como un recurso educativo con la capacidad para transformar cualquier escenario real en un tablero lúdico, generando un óptimo aprendizaje.

Para comenzar a generar una propuesta a partir de la comprensión del espacio educativo de los estudiantes de ICO, las primeras acciones que realizamos fueron las siguientes:

- Análisis del plan de estudios vigente de ICO.
- Asistencia a clases de EyM.
- Entrevistas a alumnos de la materia.

En este trabajo exponemos los resultados de esos tres ejercicios.

1. Desarrollo de actividades

Debido a que este trabajo de investigación se realizó por alumnos de pedagogía, ajenos a las formas de estudio de la carrera de ICO, fue pertinente asistir a algunas clases de EyM en las que se impartía la ley de Gauss, tema relevante en lo que se trabajaría en el proyecto en general. En estas clases realizamos una serie de observaciones, no solo para indagar en el tipo de saberes que se proporcionan en la asignatura, sino también para entender cuál es la dinámica dentro de ella y formular una serie de supuestos de cómo podría ser aplicada la RA. Por ejemplo, identificamos que algunos de estos supuestos serían:

1. El uso de los gráficos de RA podrá ayudar a la comprensión de los conceptos de las ecuaciones de Maxwell.
2. El índice de reprobación en la asignatura será más bajo.
3. Una secuencia didáctica, bien trabajada alrededor de la ley de Gauss, ayudará a comprenderla, debido a la complejidad del tema.

Después de precisar estos supuestos, se procedió a realizar un análisis del plan de estudios, con la idea de contrastarlo con lo que observamos en clase. Como señala Furlán (1986), hay una relación entre el currículo, el plan de estudios y los programas escolares. Una manera de entender al currículo es como un proyecto de individuo a formar. Dentro de este proyecto existen una serie de intenciones sobre las cualidades que debe adquirir el ingeniero en computación, las cuales se deben ver reflejadas en el plan de estudios y en el temario de las asignaturas que forman parte del programa de estudios. Retomar este enfoque como base tiene sentido, ya que la propuesta de este trabajo es brindar, tanto al estudiante como al profesor, nuevas formas de construir conocimientos que sean significativos para el desarrollo profesional del estudiante.

Por esta razón, se recurrió al primer tomo del plan de estudios, que es la justificación de su existencia, y donde se puede encontrar el porqué de la carrera, sus requerimientos y su finalidad. . Luego de examinar los objetivos, el perfil de egreso, el perfil profesional y la relación del ingeniero en computación con el mercado laboral, llegamos a la conclusión de que las diversas características que abarcan las habilidades y actitudes del ingeniero en Computación en su ejercicio profesional son claras y entendibles, como se expresa en el siguiente apartado del plan de estudios de ICO:

El egresado de la Licenciatura de Ingeniería en Computación cuenta con los conocimientos sólidos en *software* y *hardware*, y un manejo fluido de los principios teóricos y de los aspectos prácticos y metodológicos para la configuración, la evaluación, el diseño y el desarrollo de obras y entornos de sistemas computacionales complejos (servicios, telecomunicaciones, arquitecturas y configuración de redes de cómputo y teleproceso, etc.); que le permitan responder a diversas necesidades con soluciones innovadoras (proponiendo metodologías, técnicas y herramientas) en las diferentes áreas con las que interactúa. (Facultad de Estudios Superiores Aragón, 2008, p. 52).

De este modo, tenemos un panorama en el cual situarnos para saber las pretensiones que se tienen sobre el estudiante. Un punto importante es que el estudiante de ICO deberá contar con una formación sólida, competente y actualizada. Como señala Goodson (2000), hay una relación entre el manejo de la práctica docente y el conocimiento,

debido a que este responde a exigencias sociales. En el plan de estudios actual, e incluso el de 1992, vemos que el ingeniero está íntimamente ligado al avance tecnológico, por tanto, los saberes que adquiriera deben ser actualizados de manera constante. El ingeniero debe, además, tener un sentido de su labor, que es dar solución a los problemas que surjan en ese avance tecnológico, en temas como la educación, la salud, la economía y el gobierno. Esta es la expectativa para cualquier profesional en su desarrollo personal.

El dominio de los sistemas computacionales en conjunto con la RA, en un proceso de aprendizaje adaptativo, permitirá presentar al estudiante contenidos altamente interactivos y personalizados.

Observando la dinámica de algunas clases, adquirimos información que nos abrió un nuevo panorama sobre esta realidad; la dificultad de este trabajo reside en que esta aproximación a la realidad estaba envuelta en una serie de factores subjetivos, por ejemplo, los diferentes puntos de vista respecto a las clases, opiniones sobre profesores, etc., ya que se trata de una investigación cualitativa.

A propósito de lo anterior, nos dice Ruiz (2016) que, al analizar de un proyecto como este: «En términos generales, su preocupación central es la descripción e interpretación de los procesos y relaciones sociales, culturales y educativos que se gestan durante el proceso de aplicación de un proyecto curricular» (p. 41). Por ello, es importante considerar que dentro de este tipo de investigación se encontrarán elementos de distinta índole, pues confluyen lo social, lo cultural, lo institucional y la dimensión personal (subjetiva) de los participantes de esta realidad educativa. Esto permite visualizarlo como una oportunidad enriquecedora, al mostrarnos diferentes perspectivas, y no tanto como un obstáculo.

Se recurrió a la entrevista semiestructurada como herramienta de recolección de datos, para contrastar la realidad de los alumnos con lo establecido en el plan de estudios. Una característica de este tipo de entrevista es darle libertad suficiente tanto al entrevistado como al entrevistador, dejar fluir sus ideas y seguir hablando sobre los puntos de interés que surjan al momento de hablar; no obstante, contar con un guion previamente elaborado evita que se pierda el sentido de la entrevista y que se divague. A continuación se muestra el guion de las entrevistas.

- Cuéntame, ¿cuál fue tu interés para cursar la carrera de ICO?

- Plátame como ha sido tu experiencia hasta este semestre en cuestiones académicas, acreditación, formas de trabajo en clase y con los maestros.
- Cuéntame qué áreas de la escuela te gustan más y cuáles no, por ejemplo, salones de clases, laboratorios y/o espacios recreativos.
- ¿Podrías explicarme cómo se ve en la sociedad al ingeniero en computación como estudiante, trabajador y ciudadano?
- Cuéntame sobre tus aspiraciones sobre el campo laboral de tu carrera al egresar de este plantel.
- Plátame qué factores consideras importantes en tu proceso como ingeniero en Computación en formación. Por ejemplo: dinero, el apoyo de la FES Aragón u otros que consideres.
- ¿Consideras conveniente usar otras herramientas aparte de las que utilizas regularmente en clases? Entiéndase por herramienta «algo que te ayuda a realizar una tarea o un trabajo específico de manera más sencilla».
- ¿De qué manera consideras que EyM sea importante en tu desarrollo académico? (Desarrollar o complementar).
- Descríbeme comúnmente cómo se desenvuelven tus clases, la manera en la que lleva la clase el profesor.

Como programa piloto, se realizaron las entrevistas a cinco estudiantes que permanecían en el curso de la profesora Piccinelli, casi al finalizar el semestre, a quienes se grabó en video y audio, con su consentimiento, y al mismo tiempo se tomaron algunas notas.

Esto nos dio un referente de cómo se concibe la carrera, y cómo la RA ofrece una posibilidad de atender a las exigencias de la comunidad estudiantil.

Lo siguiente fue realizar un vaciado de la información en un cuadro de tres entradas. La primera entrada es para los testimonios; se transcribió textualmente lo dicho por los entrevistados, omitiendo silencios, muletillas o errores de pronunciación. La segunda entrada se dedicó al análisis, esta columna procede de una previa discriminación en la transcripción, en la cual se subrayaron aquellas frases que nos provocaron interés al leer los testimonios. En la columna «análisis» se colocaron casi textualmente las frases subrayadas, aunque con modificaciones que resultaron en frases más concisas. Por último, en la tercera entrada interpretación se colocó lo más significativo y lo más

relevante que se podía extraer de los testimonios. Esta es la columna más corta.

Una vez concluido el análisis de los testimonios, descubrimos ciertos patrones, por lo cual se realizó un cuadro más, en esta ocasión de dos entradas (cuadro 1). En la primera, columna correspondiente a las fortalezas, se colocaron todas las partes positivas que nos provocaron interés, sobre las cuales podríamos seguir trabajando como un apoyo para la formulación de una secuencia didáctica; en la segunda columna, dedicada a las tensiones, se colocaron aquellas situaciones problemáticas.

Cuadro 1. Fortalezas y tensiones en los resultados de las encuestas

FORTALEZAS	TENSIONES
El uso de los espacios dentro de la facultad es accesible para la ejecución de sus trabajos.	Bajo interés por las clases que pertenecen al área de hardware, donde se encuentra la asignatura de EyM
Los estudios del ingeniero en Computación tienen un impacto visible en la vida cotidiana.	Alto grado de dificultad de la clase de EyM.
Las necesidades mínimas materiales para poder cursar la carrera pueden sustentarse fácilmente.	Falta de actualización del plan de estudios en los requerimientos del estudiante de ICO.
Ser autodidacta (que el alumno busque conocimiento fuera del aula) en ICO.	La dinámica de clases se ha vuelto una tradición, al menos para los alumnos.
Los alumnos tienen conocimiento sobre otras tecnologías que apoyan el aprendizaje y formas de estudio.	Dificultad para comprender ciertos fenómenos sin un apoyo gráfico.

Se logró con estas entrevistas identificar que existen constantes problemáticas: no se comprenden los temas, inquietud de los alumnos por complementar sus conocimientos con el uso de la tecnología y gran dificultad para aprobar la asignatura de EyM.

Por ello, se propone como plan de acción durante la realización del proyecto, y en conjunto con los compañeros de ICO, la implementación de una secuencia didáctica, teniendo en cuenta que las características de la RA deberán tener un buen sustento, para que esta tenga una realización a largo plazo y no sea solo una herramienta más, aplicada sin algún sentido pedagógico.

Resulta necesario explicar a qué nos referimos cuando hablamos de una secuencia didáctica y por qué es necesaria su implementación con RA. Hemos encontrado que una de las críticas al uso de dispositivos tecnológicos para el aprendizaje es la ausencia de un plan pedagógico

que integre los recursos de la herramienta utilizada a una secuencia diseñada expresamente para el desarrollo de competencias. Como señala Díaz Barriga (s. f.):

La secuencia didáctica es el resultado de establecer una serie de actividades de aprendizaje que tengan un orden interno entre sí [...] la secuencia demanda que el estudiante realice cosas, no ejercicios rutinarios o monótonos, sino acciones que vinculen sus conocimientos y experiencias previas con algún interrogante que provenga de lo real y con información sobre un objeto de conocimiento. (p. 5).

Por consiguiente, una adecuada secuencia didáctica servirá para la implementación de RA dentro del aula, porque permite organizar situaciones de aprendizaje que contemplan contenidos, contexto y elementos de la realidad de los estudiantes. Es importante su carácter secuencial porque permite dar continuidad al tema que se desea trabajar mediante varias sesiones, de esta forma se evita transmitir a los alumnos conocimientos sesgados y discontinuos. Por lo tanto, al no ser utilizada con anterioridad la RA en EyM, representa un nuevo reto en cuanto al diseño para que el alumno pueda tener un aprendizaje significativo de los temas que se tratan.

El diseño de la secuencia didáctica propuesta aún se encuentra en construcción, ya que todavía es necesario recabar información más específica de las principales dificultades del tema en cuestión. Para ello, se está investigando la población estudiantil que ha cursado o se encuentre cursando esta asignatura (EyM). Además, se están elaborando cuestionarios y entrevistas para estudiantes y profesores con la finalidad de obtener toda la información posible, que pueda brindarnos puntos clave para la elaboración de la secuencia.

Es necesario comentar que antes de tener una secuencia didáctica final tendremos prototipos de ellas, y así mismo las aplicaremos para constatar su funcionamiento en el aula. Cabe aclarar que estos prototipos serán susceptibles de modificaciones, para poder contemplar otras necesidades que se muestren en las diferentes aplicaciones de las secuencias didácticas.

2. La necesidad de nuevas tecnologías en el aula

El trabajo que realizamos está motivado por algunos planteamientos que nos hizo la profesora Piccinelli. Durante los años en que ha

impartido la materia de EyM, ella ha encontrado dificultades para lograr que los estudiantes de ICO entiendan las ecuaciones de Maxwell y, en particular, la ley de Gauss. Ligado a lo anterior, en sus cursos existe un alto índice de reprobación.

Por otro lado, la profesora considera que una posible solución a esta situación puede enmarcarse en el proyecto de nuestra universidad de introducir las tecnologías de la información y comunicación (TIC) en el ámbito de la educación; es decir, pasar de las TIC a las TAC (tecnologías del aprendizaje y el conocimiento).

Creemos que puede haber diversos factores que inciden sobre la reprobación, y su identificación es el inicio de esta investigación.

A partir de la aplicación de entrevistas a alumnos de ICO que cursaron la asignatura durante el semestre 2019-I, un problema identificado es cómo ser innovador al introducir nuevos elementos en el espacio del aula, apelando a un cambio en la tradición de enseñanza dentro de la carrera de ICO, sin romper por completo con el orden establecido.

En estas entrevistas los alumnos expresaron su inquietud respecto al desfase que existe entre el avance de la tecnología y el plan de estudios.

Uno de los testimonios analizados expresaba: «nuestro plan de estudios no va de la mano con el crecimiento de nuestro campo, ya que la tecnología crece rápidamente y esta va a la par del desarrollo tecnológico que se vive día a día».

En el análisis del plan de estudios logramos encontrar un primer acercamiento a la base que sustentará el enfoque con el cual pretendemos trabajar, debido a que existe un apartado dedicado a su enfoque pedagógico, el constructivismo.

Palmero (2010) nos hace saber lo siguiente acerca del autor de esta teoría:

Ausubel entiende que una teoría del aprendizaje escolar que sea realista y científicamente viable debe ocuparse del carácter complejo y significativo que tiene el aprendizaje verbal y simbólico. Asimismo, y con objeto de lograr esa significatividad, debe prestar atención a todos y cada uno de los elementos y factores que le afectan, que pueden ser manipulados para tal fin. Por lo tanto, su ámbito de aplicación es el aprendizaje y enseñanza de cualquier cuerpo organizado de conocimiento, lo que constituye las diferentes disciplinas científicas que configuran el currículum escolar. (p. 10).

Nuestro objetivo está ligado a lo que sustenta Palmero sobre el enfoque constructivista, ya que la finalidad del proyecto es ofrecer al docente representaciones de fenómenos físicos en RA con su respectiva secuencia didáctica. De esta manera, los profesores podrían tener la oportunidad de apoyarse en herramientas como esta para ofrecer un acercamiento más atractivo e innovador para sus alumnos.

Pensamos que la RA puede resultar un medio de enseñanza atractivo para los estudiantes de ICO, puesto que se trata de una TIC, como otras con las que gustan y suelen trabajar durante su carrera. Debido a la naturaleza interactiva de esta tecnología y su amplio potencial en aplicaciones donde se destaca la parte visual, pensamos que puede resultar muy útil para progresar en la solución de dificultades relacionadas con la visualización y la representación gráfica de fenómenos físicos que los alumnos tienen que estudiar y comprender. Mejorar los procesos de visualización y representación podría incidir, a su vez, en la comprensión de los temas y en el proceso de adquisición de conocimientos.

En resumen, nuestra investigación tiene la finalidad de contribuir a que el alumno pueda comprender mejor las ecuaciones de Maxwell con ayuda de la RA y de introducir esta última como una herramienta novedosa en la práctica docente.

Conclusiones y perspectivas

El resultado preliminar de diferentes análisis y pruebas aplicadas nos llevó a visualizar un área de oportunidad en la materia de EyM para la incorporación de una estrategia didáctica con RA. Nuestras primeras conclusiones son que el plan de estudios no está acorde con el paradigma constructivista y que los alumnos sugieren una implementación de nuevas tecnologías en el aula.

Con base en las necesidades expresadas por los estudiantes, estamos trabajando en introducir la realidad aumentada en un proceso de enseñanza-aprendizaje de las ecuaciones de Maxwell, con la idea de que esta tenga no solo un uso aplicativo, sino que represente un apoyo significativo en la educación.

A partir de diferentes problemáticas encontradas, se construirá una serie de secuencias didácticas, en las que se tomen en cuenta las necesidades expuestas sobre el uso de nuevas formas de trabajo en la asignatura. Pero resulta necesario que el docente sepa dominar las nuevas formas de aprendizaje, que el alumnado mejore su dominio en

el tema y que experimenten ambos con nuevas herramientas de apoyo para que construyan nuevos aprendizajes.

Pensamos que el uso de novedosas tecnologías tiene el potencial de mejorar las oportunidades en el campo académico y laboral, ya que el alumno, al haber sido parte de diversos procesos y métodos de aprendizaje, tendrá un panorama más amplio de sus proyectos futuros.

Bibliografía

- DÍAZ BARRIGA, A. (s. f.): «Guía para la elaboración de una secuencia didáctica», Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), <http://www.setse.org.mx/ReformaEducativa/Rumbo%20a%20la%20Primera%20Evaluaci%C3%B3n/Factores%20de%20Evaluaci%C3%B3n/Pr%C3%A1ctica%20Profesional/Gu%C3%ADa-secuencias-didacticas_Angel%20D%C3%ADaz.pdf> [28/2/2019].
- «EduTrends: «realidad aumentada y virtual» (2017), Observatorio de Innovación Educativa del Tecnológico de Monterrey, diciembre, <<https://observatorio.tec.mx/edu-trends-realidad-virtual-y-realidad-aumentada>> [28/2/2019].
- FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN (2008): «Plan de estudios, Ingeniería en Computación», México D. F.: Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- FURLÁN, J. (1986): «Notas y claves para una construcción en la cuestión del currículo», en *Memoria del Foro de Análisis del Currículo de la Licenciatura en Pedagogía de la ENEP*, Aragón, México D. F.: Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), pp. 11-22.
- GOODSON, I. (2000): «Carros de fuego», en *Etimologías, epistemologías y la emergencia del currículum*, Barcelona: Octaedro, pp. 56-76.
- PALMERO, L. (2010): *La teoría del aprendizaje significativo en la perspectiva de la psicología cognitiva*, Barcelona: Octaedro.
- RUIZ LARRAGUIVEL, E. (2016): «Propuesta de un modelo de evaluación curricular para el nivel superior (una orientación cualitativa)». México, D. F.: Instituto de Investigaciones sobre la Universidad y la Educación-Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), <<http://132.248.192.241/~editorial/wp-content/uploads/2016/06/propuesta-de-un-modelo-de-evaluacion-curricular-para-el-nivel-superior-una-orientacion-cualitativa.pdf>> [28/2/2019].



Realidad aumentada en el estudio del electromagnetismo en la formación de ingenieros en Computación

PEDRO URIEL MARTÍNEZ MARTÍNEZ,* GABRIELLA PICCINELLI BOCCHI**

Introducción

Entre una profesora y un grupo de alumnos de la carrera de Ingeniería en Computación (ICO) (de la Facultad de Estudios Superiores Aragón, de la Universidad Nacional Autónoma de México) elaboramos y presentamos una propuesta en la que usamos realidad aumentada (RA) como apoyo al proceso de enseñanza-aprendizaje (PEA) en la asignatura de Electricidad y Magnetismo, concretamente en las ecuaciones de Maxwell. Comenzamos a trabajar con la ley de Gauss, pues hemos detectado frecuentes dificultades de los estudiantes de ICO para apropiarse del conocimiento relacionado con esta ley.

Pensamos en la posibilidad de incorporar alguna tecnología de la información y las comunicaciones (TIC) a una propuesta de solución para estas dificultades, dado que los alumnos de ingeniería en computación tienen el potencial de solucionar problemas usando herramientas computacionales.

Nos resultó particularmente interesante la RA, una herramienta que permite conjuntar información digital con elementos reales en un solo entorno, para intentar crear representaciones de los fenómenos físicos que sean atractivas, sugestivas, interactivas y promuevan la participación. Con esto, además de mejorar la visualización con respecto a los soportes tradicionales (como libros o pizarrones), intentamos motivar el interés de los estudiantes por apropiarse de la tecnología,

* Facultad de Estudios Superiores Aragón, Universidad Nacional Autónoma de México, México D. F.

** Centro Tecnológico Aragón, Facultad de Estudios Superiores Aragón, Universidad Nacional Autónoma de México, México D. F.

por realizar sus propios ejercicios de RA para abordar el tema en estudio y, tal vez, influir en su proceso de análisis y abstracción.

Por otro lado, también somos conscientes de que las TIC no mejoran el PEA sin la adecuada construcción del conocimiento. Decidimos, por lo tanto, invitar a un grupo de estudiantes de Pedagogía para que nos ayudaran a construir una secuencia didáctica para el estudio de la ley de Gauss. Como primer paso, acudimos con ellos al aula para observar directamente el desarrollo de las lecciones típicas que se imparten durante el semestre.

En esta ponencia se exponen los resultados preliminares de ese proyecto.¹ Comenzaremos con una breve reflexión sobre los elementos y conceptos indispensables para el estudio de la ley de Gauss; presentaremos enseguida las dificultades que hemos detectado en la materia de Electricidad y Magnetismo, en general, y en la ley de Gauss, en particular; a continuación, expondremos nuestra propuesta, delineando las características de la RA que nos permiten suponer que esta nos ayudará en el PEA del tema; finalmente, mostraremos algunas visualizaciones en RA. Terminaremos con unas conclusiones preliminares y con las perspectivas de nuestro trabajo.

1. Marco teórico

La realidad aumentada

La realidad aumentada (RA) es una tecnología que hace posible la mezcla de información digital con objetos, personas y escenarios reales (Azuma, 1977). Se sirve de monitores o pantallas, cámaras, computadoras o dispositivos móviles y *software* específico para combinar lo real y lo digital.

Blázquez-Sevilla (2017) precisa que «la RA podría definirse como aquella información adicional que se obtiene de la observación de un entorno, captado a través de la cámara de un dispositivo que previamente tiene instalado un *software* específico» (p. 2). La cámara capta la parte de la realidad con la que se van a mezclar los elementos digitales que genera la computadora o el dispositivo en cuestión, la computadora con ayuda de un *software* superpone la información digital a lo que la cámara está captando y el monitor los muestra mezclados como

¹ Este trabajo fue realizado con el apoyo del programa UNAM-DGAPA-PAPIME PE110418.

si se tratara de una nueva ventana a un mundo diferente, un nuevo contexto.

Para que la información digital comience a mostrarse junto con aquello que la cámara está captando es necesario que esta identifique y valide la existencia de un disparador en la escena; una vez que se realiza este paso comenzamos a observar la RA.

Explica Blázquez-Sevilla (2017): «La información adicional identificada como RA puede traducirse en diferentes formatos. Puede ser una imagen, un carrusel de imágenes, un archivo de audio, un video o un enlace» (p. 2).

La realidad aumentada en el ámbito educativo

Realizamos una revisión de publicaciones acerca del uso de la RA en el ámbito educativo para indagar en el estado del arte en esta materia, identificar metodologías y técnicas de investigación usadas y conocer los resultados. A continuación mencionaremos solo algunos, a modo de ejemplo, puntualizando sus objetivos y resultados.

Elegimos tres publicaciones debido a que en ellas encontramos de forma detallada el trabajo realizado por los autores y también objetivos y metodologías similares a lo que nosotros buscamos con RA, aunque no en nuestra misma área de conocimientos.

En la investigación realizada por Martínez-Hung *et al.* (2019), un grupo de profesores trabajaron en dos asignaturas, Química Inorgánica II y Química de Materiales, pertenecientes a dos años distintos de la Licenciatura en Química de la Facultad de Ciencias Naturales en la Universidad de Oriente (Cuba). Ellos mencionan, como una justificación a su trabajo, que la comprensión de la química recae en la capacidad de entender y visualizar fenómenos químicos, tales como la estructura tridimensional de las moléculas.

Eligieron implementar RA como medio de enseñanza para ayudar a desarrollar la inteligencia espacial en los 30 alumnos participantes. Crearon modelos virtuales para representar modelos moleculares y llevarlos a RA usando marcadores.

En la primera asignatura eligieron el tema «Compuestos de coordinación» y reflexionaron sobre el uso de modelos tridimensionales para facilitar la comprensión de las estructuras y conceptos. A los estudiantes les dieron un marcador e información acerca de los complejos que debían analizar teórica y estructuralmente. A continuación, en una actividad práctica, emplearon los modelos en RA. Los estudiantes

debían identificar isómeros ópticos y lograr predecir diagramas de desdoblamiento para diferentes geometrías. En la segunda asignatura eligieron emplear RA en el tema «Estructura de sólidos».

Los modelos permitieron a los alumnos la visualización de las estructuras, y su análisis, en efecto, se facilitó. La observación de defectos estequiométricos y lineales tributó al conocimiento de sólidos reales y su papel en los materiales.

Mediante una encuesta, buscaron conocer la opinión de los estudiantes sobre el uso de la RA en las asignaturas. La mayoría consideró que la RA los ayudó en la comprensión del tema, la adquisición de conocimientos y a mantener la atención en las clases, por lo tanto, contribuyó a su motivación por las asignaturas.

Otros interesantes hallazgos son:

- Pese a lo novedoso que les resultó el uso de la RA, no fue difícil emplearla.
- Consideran que el uso de los modelos podría ampliarse a otros temas, actividades e incluso asignaturas.
- No se observaron diferencias sustanciales en sus respuestas a pesar de pertenecer a distintos años de la carrera.

En el estudio llevado a cabo por Cózar-Gutiérrez *et al.* (2015) participaron 23 estudiantes del grado de maestro en Educación Infantil y Primaria, en la Facultad de Educación de Albacete, España. El proyecto tenía la finalidad de favorecer la organización de actividades que permitieran desarrollar procesos educativos relacionados con las manifestaciones artísticas y culturales del patrimonio a su alrededor. Los profesores prepararon una experiencia didáctica y práctica en la que los participantes tuvieron que crear sus propios objetos de RA a partir de imágenes del patrimonio cultural cercano a ellos (colecciones arqueológicas, monumentos de su ciudad, etc.), con ayuda de *software* instalado en equipos de cómputo, aplicaciones móviles y sus dispositivos móviles. Terminado este proceso, debían presentarlo y definir sus resultados por medio de tres procedimientos: autoevaluación, coevaluación y evaluación por parte del profesor.

Con esta actividad, los profesores buscaron que los estudiantes dieran su opinión sobre la aplicación educativa de la RA, que conocieran las oportunidades que les ofrece el patrimonio cultural que les rodea (Castilla-La Mancha), así como introducirlos al uso de herramientas,

recursos y aplicaciones didácticas necesarias para enseñar contenidos culturales en su futura práctica docente.

La RA tuvo una valoración «buena» por la totalidad de los participantes. La calificaron con base en su experiencia con adjetivos como «innovadora», «original», «motivadora» e «interesante» (en orden de mayoría de respuestas obtenidas en el cuestionario aplicado).

Por otro lado, también expresaron algunos inconvenientes. Algunas de los criterios compartidos fueron: «La RA produce distracción y alboroto», «Hay reticencias para trabajar con esta herramienta», «Existe un desconocimiento de la herramienta» y «Es complicada» (en orden de mayoría de respuestas obtenidas en el cuestionario aplicado).

Se concluyó que el uso de RA:

- Aporta alternativas para favorecer el aprendizaje interactivo y significativo en los PEA que diseñaron y experimentaron los participantes.
- Ofrece muchas posibilidades para elaborar material didáctico y actividades de aprendizaje, en concreto, a la hora de estudiar y exponer los contenidos relacionados con la historia e historia del arte de su entorno cercano y de las ciencias sociales en cualquier nivel educativo.
- Puede ser útil para acercar los museos a las aulas a coste cero.
- Facilita la comprensión de contenidos.
- Implica la necesidad de una formación introductoria en esta herramienta para los profesores que la deseen emplear.

Finalmente, los profesores expresan que aún es necesario un mayor número de estudios para demostrar los beneficios didácticos de la RA y establecer el nivel educativo en el cual se pueden conseguir los mejores resultados, en dependencia del tipo de contenidos a trabajar.

Para evaluar la posibilidad de sustituir modelos físicos de aluminio por sus respectivos símiles virtuales en materias artísticas, Torre-Cantero *et al.* (2013) plantean el uso de RA y tabletas electrónicas para abordar la comprensión del espacio tridimensional.

Los profesores trabajaron con 62 estudiantes, entre estudiantes de Bellas Artes de la Universidad y de nivel secundario de La Laguna (España), y 17 profesores de educación secundaria de las materias de Arte y Tecnología de la isla de Tenerife. Estaban interesados en determinar si el uso de modelos físicos es útil para que los alumnos universitarios

realicen sus bocetos desde distintas perspectivas y puedan comprender la relación entre el mundo real y sus representaciones bidimensionales. Años atrás los profesores ya habían realizado talleres en los que usaban modelos físicos de aluminio para mejorar la capacidad espacial de sus estudiantes, sin embargo, detectaron dificultades para trasladar a distintos centros de estudio cómodamente y a bajo precio estos materiales, imprescindibles para sus talleres. Debido a esto, comenzaron a buscar alternativas para sustituir los modelos físicos por modelos virtuales con la posibilidad de manipularlos de manera similar a como lo harían con los reales.

En las asignaturas de Sistemas de Representación, Tecnología, y Dibujo y Tecnología emplearon seis modelos físicos y su versión en RA y en la pantalla de las tabletas electrónicas. Los estudiantes debían dibujar seis vistas normalizadas de las seis piezas: los primeros dos dibujos basados en los modelos físicos, dos más trabajando con RA y los dos últimos viendo las piezas en las tabletas. También debían contestar un cuestionario para valorar global y específicamente las tecnologías empleadas. La valoración específica fue en torno a tres parámetros: mejora de la atención en clase, utilidad y facilidad de uso.

Los cuestionarios arrojaron una valoración global positiva para los modelos físicos y sus dos alternativas digitales. Se observó preferencia por las tabletas frente a la RA por parte de todos los participantes. En la valoración específica, tanto la RA como los modelos en las tabletas fueron muy bien evaluados, aunque aquí también la RA quedó ligeramente por debajo frente a los modelos en las tabletas. En particular, en cuanto a la facilidad de uso los profesores valoraron de manera más positiva a las tabletas digitales que a la RA. Los estudiantes de educación superior fueron los que peor evaluaron ambas alternativas tecnológicas.

La ley de Gauss

La ley de Gauss es uno de los cuatro pilares del electromagnetismo, su enunciado dice que el flujo eléctrico neto a través de cualquier superficie cerrada hipotética es proporcional a la carga eléctrica neta encerrada por dicha superficie. Su ecuación es la siguiente:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{1}{\epsilon_0} q \quad (1),$$

donde \vec{E} es el campo eléctrico, $d\vec{A}$, el vector diferencial de área, q es la carga eléctrica y ϵ_0 es la constante de permitividad del vacío (Purcell y Morin, 2013).

El estudio de esta ley corresponde a la primera unidad del temario de la asignatura de Electricidad y Magnetismo, y está precedido por los conceptos de carga eléctrica, campo eléctrico, líneas de campo eléctrico, flujo eléctrico y la ley de Coulomb. La asignatura es parte del mapa curricular para el tercer semestre de los ingenieros en Computación y está precedida por las asignaturas de Álgebra, Cálculo Diferencial e Integral, Cálculo Vectorial y Geometría Analítica.

2. Dificultades en torno al estudio de la ley de Gauss

A lo largo de varios semestres de impartir la materia, encontramos que, normalmente, los alumnos aprenden el enunciado de la ley de Gauss y su ecuación, resuelven preguntas y problemas sencillos, sin embargo, no siempre logran interpretar el sentido físico de esta ley, ni aplicarla a una nueva situación física para extraer la información requerida. Por otro lado, parecería que los fenómenos físicos que suelen analizar mientras estudian la ley de Gauss se van quedando aislados uno del otro.

Algunas de las dificultades y necesidades que pudimos detectar cuando acudimos al aula están relacionadas con:

1. Visualizar las líneas de campo eléctrico para distribuciones de carga desde diferentes perspectivas.
2. Deducir la configuración de las líneas de campo con base en la simetría del problema.
3. Aceptar la utilidad de trazar una superficie imaginaria para abordar un problema concreto.
4. Comprender los conceptos de flujo y flujo neto. ¿Las cargas cercanas externas a la superficie cerrada afectan al flujo eléctrico a través de esta? y ¿afectan al campo en un punto determinado del espacio?
5. Hacer de una representación gráfica y mental en tres dimensiones que les permita visualizar la relación entre los vectores que representan elementos infinitesimales de área y los vectores de campo eléctrico de un cuerpo conductor. ¿Los vectores de área corresponden al conductor mismo o a la superficie gaussiana?

6. Decidir la forma de la superficie gaussiana, en dependencia de la simetría de la distribución de carga, para simplificar el problema y obtener un campo uniforme en la superficie. Este problema se agudiza al interior de un cuerpo conductor.
7. Darse cuenta de que una superficie cerrada se puede descomponer en varias superficies abiertas.
8. Entender el significado que tienen las integrales sobre superficies cerradas.
9. Entender la distribución de las cargas eléctricas en exceso en un conductor en equilibrio electrostático y concebir que el campo eléctrico en un conductor cargado aislado tiene que ser nulo en el interior y, en la superficie, perpendicular a esta.

Estas son las principales dudas que hemos podido detectar, pero en este aspecto nuestro trabajo de campo continúa.

3. Nuestra propuesta en la enseñanza de la ley de Gauss empleando RA

Como ya mencionamos, al trabajar con futuros ingenieros en computación, se nos hizo natural el trabajo con las TIC para tratar de motivarlos e involucrarlos en el proceso de apropiación del conocimiento en una materia que suelen considerar alejada de su área de interés.

En particular, en el estudio de la ley de Gauss, pensamos en la RA para intentar resolver algunas de las dificultades mencionadas, puesto que esta tecnología permite conjuntar objetos reales, como sería un objeto cargado, con virtuales, como una superficie gaussiana, y conceptos abstractos, por ejemplo, las líneas de campo y el flujo eléctrico.

Además, esta herramienta permite cambiar ágilmente la forma de la superficie gaussiana para ver cuál se adapta mejor a la geometría de la distribución de carga y ofrece una alternativa de visualización del problema, desde varios puntos de vista, con una perspectiva de tridimensionalidad.

El funcionamiento de todas las visualizaciones que presentamos a continuación se basa en marcadores impresos y funcionan en un navegador de Internet con conexión, ya se trate de una computadora o un dispositivo móvil (preferiblemente Google Chrome, Firefox o Safari, a través de una ventana de navegación privada, en caso de que en una ventana no privada no aparezca en la pantalla la visualización luego de mostrar el marcador frente a la cámara). Todas se pueden encontrar en la página web <https://glitch.com/@petrvs2/tibero>.

Una vez que accedemos a la dirección web de la visualización en cuestión, el navegador solicitará al usuario acceso a la cámara del dispositivo. Cuando la cámara comience a funcionar, será el momento de presentar el marcador (se puede descargar desde una liga visible en las mismas páginas web) frente a ella para que lo pueda reconocer y validar; luego de este paso, comenzaremos a ver la información digital añadida al escenario real que la cámara captura.

Hemos realizado estas visualizaciones pensando en que el usuario no tenga que mantener el marcador sostenido frente a la cámara todo el tiempo, pues esto resulta engorroso después de un tiempo. Típicamente, si quitamos el marcador del campo de visión de la cámara, la visualización se detiene, sin embargo, con estas visualizaciones no sucede así. El marcador sirve para indicar el sitio exacto de nuestro entorno donde queremos que se muestre la información. Esta manera de «situar» nuestra visualización en RA donde más convenga ofrece la posibilidad de que, por ejemplo, el profesor la use para, al mismo tiempo que los estudiantes la observan, repasar la teoría sobre las cargas eléctricas y la ecuación para calcular la magnitud de su campo eléctrico, sin la necesidad de emplear tiempo de la clase en dibujar sobre el pizarrón la misma representación que, con esta tecnología, puede mostrar a sus alumnos de manera casi instantánea.

Modificar la posición del marcador frente a la cámara y viceversa también permite cambiar el tamaño de la visualización guardando sus proporciones o, por otro lado, podemos mantener fija la cámara y girar el marcador sobre el eje perpendicular a su plano para apreciar la visualización en sus 360° a través de la pantalla del dispositivo en cuestión.

Pensamos que esta característica nos permitirá sacarle provecho a cada visualización de distintas formas dentro del aula. Por ejemplo, mientras la misma visualización se encuentra ejecutándose, el profesor puede usarla combinándola con otras herramientas que se suelen tener a la mano en el aula, tales como pizarrones para hacer demostraciones o resolver ejercicios.

A continuación presentamos varias visualizaciones en RA para intentar superar algunas de las dificultades que describimos en la sección anterior.

Abordaremos la primera dificultad empleando dos visualizaciones en RA para mostrar la configuración de las líneas de campo eléctrico en distintas situaciones:

- Cargas eléctricas puntuales (positivas y negativas): para la primera visualización se emplearán dos marcadores distintos, de los cuales se presenta primero uno frente a la cámara, para que aparezca en la pantalla del dispositivo en cuestión la representación de una carga puntual (positiva o negativa en dependencia de la liga empleada: <https://carga-positiva.glitch.me/>, <https://carga-negativa.glitch.me/>, con sus respectivas líneas de campo eléctrico. Este ejemplo lo pensamos así con el objetivo de poder apreciar la simetría radial que tiene el campo eléctrico de una carga, independientemente de su signo, pero haciendo énfasis en que el sentido de las líneas de campo cambia en función del signo de la carga. Poder «situar» nuestra visualización en RA donde más convenga, usando el marcador, ofrece la posibilidad de que, como ya habíamos mencionado, el profesor la use para que al mismo tiempo que los estudiantes la observan se realicen distintas actividades (hacer demostraciones o ejercicios). También es posible colocar de manera simultánea ambos marcadores frente a la cámara y lograr que las dos representaciones aparezcan en la pantalla a la vez (<https://cargas-puntuales.glitch.me/>).
- Un dipolo y dos cargas del mismo signo, desde distintas perspectivas: procedemos a mostrar los dos marcadores a la cámara al mismo tiempo que los vamos juntando hasta que el primero quede encima del otro, lo cual crea un tercer marcador a partir de la sobreposición de los dos primeros. Este tercer marcador sirve para que se muestre la representación de un dipolo eléctrico con sus respectivas líneas de campo eléctrico.

Usaremos tres visualizaciones para atender los puntos 3 y 4 en el aula:

- En la primera (<https://campo-uniforme.glitch.me/>) utilizaremos un marcador para que en la pantalla aparezcan representadas líneas de campo para un campo eléctrico uniforme sin dar detalles de su origen. Se mostrarán en la pantalla líneas de campo representando un campo vectorial uniforme, como si se tratara del campo eléctrico entre dos láminas con cargas de signos opuestos, pero sin mostrar tales láminas. Esto se hace con el objetivo de contar con una visualización de un campo vectorial uniforme y aclarar que, para comprender

el concepto de flujo eléctrico podemos considerar las líneas de campo eléctrico, como líneas de flujo, y que, si bien en el caso eléctrico no existe flujo de la misma forma que para un fluido o sustancia líquida, las líneas de campo nos marcan el desplazamiento que tendría una partícula cargada si se encontrara en medio del campo que observamos (como puede verse en la esfera de color rojo que representa a una partícula cargada positivamente). Podemos utilizar esta visualización desde distintas perspectivas gracias a los movimientos que es posible hacer con el marcador frente a la cámara, y así usarla de manera simultánea con otras herramientas en el aula.

- En la segunda (<https://campou-superficie.glitch.me/>) introduciremos la idea de superficie imaginaria para exponer la forma en que se puede relacionar el flujo con el número de líneas de campo que la atraviesan y realizar una dinámica en la que participen los alumnos para ejemplificar el flujo a través de una superficie. Veremos lo mismo que en la anterior visualización, un campo eléctrico uniforme, pero ahora como una superficie cuadrada atravesada por algunas líneas de campo. El siguiente paso es usar el marcador para lograr que la visualización ocupe, en perspectiva, un espacio dentro del aula de tal forma que la superficie cuadrada tenga casi la misma altura de una persona. A continuación se explica que las líneas de campo eléctrico que atraviesan a la superficie se pueden considerar intuitivamente como una medida del flujo a través de ella y que así será de ahora en adelante cuando se trate de flujo eléctrico. Se realizará, entonces, una demostración del camino que seguiría un cuerpo cargado en la dirección marcada por las líneas de campo eléctrico que atraviesan la superficie; para esto, le pediremos a un alumno que se pare en el extremo donde comienza una de las líneas del campo y camine siguiendo la dirección que marca, atravesando la superficie hipotética. Si repetimos esta dinámica, pero ahora con más de una persona, una por cada línea de campo que atraviesa la superficie, se puede deducir que, entre más líneas de campo atraviesen a la superficie, el flujo a través de esta será mayor.
- En la tercera visualización (<https://campou-superficie.glitch.me/>) introduciremos la noción de superficie cerrada

imaginaria (superficie gaussiana); la utilizaremos para introducir el concepto de flujo neto y visualizar líneas de fuerza de una fuente o un sumidero para ese flujo. Se mostrará la misma situación que en el caso anterior, pero cambiando de superficie, ahora esta será cerrada; en este caso, un cilindro con su eje orientado horizontalmente, con los planos circulares de sus tapas perpendiculares a las líneas de campo y de tal forma que sea atravesado por algunas de ellas. A partir de este punto, introduciremos los conceptos de flujo positivo y negativo respecto a la superficie cerrada, esclareciendo que las líneas de campo que atraviesan al cilindro de afuera hacia adentro producen un flujo negativo y las que lo hacen de adentro hacia afuera producen un flujo positivo. Podemos emplear la misma dinámica anterior con los alumnos para hacer que caminen siguiendo las líneas de campo (una persona por línea a la vez). También podemos introducir el concepto de flujo neto, que para nuestro ejemplo es igual al número de líneas de flujo que salen de la superficie menos el número de líneas que entran. Dado que, desde un principio realizamos esta visualización pensando en no mostrar las cargas eléctricas en las placas que originan el campo eléctrico, nos daremos cuenta de que, sin importar cómo coloquemos al cilindro, no tendríamos un ejemplo donde el flujo eléctrico a través de la superficie cerrada sea distinto de cero.

Para abordar las dificultades 5, 6 y 7, usaremos dos visualizaciones:

- Mostrar los vectores diferenciales de campo eléctrico en las distintas partes del cilindro: en la primera visualización (<https://campou-vectoresd.glitch.me/>) usaremos como base la anterior, el campo eléctrico uniforme con un cilindro, pero ahora se incluirá la representación de los vectores diferenciales de campo eléctrico en la superficie e introduciremos el concepto de vector de área, cuya magnitud es igual al área de cada sección de superficie, ya sean las tapas o la pared cilíndrica, y su dirección será normal a la superficie. Esto se hará de tal forma que podamos ver la orientación y el ángulo que hay entre ellos. Mientras visualizamos esta nueva situación explicaremos la relación entre el ángulo que existe entre estos

vectores y el producto, punto que observamos en la ecuación de la ley de Gauss. Esto nos dará pie para hablar sobre la teoría de las integrales sobre superficies cerradas y de la posibilidad de considerar una superficie cerrada (el cilindro) como la suma de superficies abiertas (los dos discos de las tapas y la pared cilíndrica).

- Demostrar la importancia de elegir una adecuada superficie gaussiana: usando superficies cerradas distintas para ver si el cilindro es el más adecuado o si se puede optar por alguna otra para el mismo campo uniforme. En la segunda visualización (<https://campou-integralsss.glitch.me/>), partiremos de la anterior para intercambiar el cilindro por una esfera y un cubo (una superficie cerrada a la vez), a fin de que los estudiantes puedan darse cuenta de que la integral en la ley de Gauss se puede simplificar, en dependencia de la superficie elegida, en función de la distribución de carga: en algunos casos el campo eléctrico será el mismo en cada punto de la superficie, y por lo tanto se podrá realizar con facilidad el producto escalar y tratar al campo como una constante, y en otros no. Si cambiamos de superficie, manteniendo la misma distribución de carga, los alumnos podrían notar que, pese a que el resultado para el flujo no se ve afectado, la estimación del campo eléctrico no siempre va a ser posible.

Finalmente, como un primer intento de una visualización en RA para ejemplificar la ley de Gauss (<https://carga-positiva-enc.glitch.me/>, <https://carga-negativa-enc.glitch.me/>), usamos una carga puntual (positiva o negativa, como las que al principio se mostraron) y un par de superficies cerradas.

Primero, un cubo aparece con su centro en el mismo punto que el centro de la carga puntual, de tal forma que esta queda completamente encerrada por la superficie. Luego, el cubo pasa a otro sitio y una esfera se coloca en el lugar que ocupaba este, encerrando a la carga.

4. Trabajo futuro sobre las visualizaciones para la ley de Gauss

Para algunas dificultades que mencionamos antes todavía no hemos pensado y elaborado más visualizaciones que nos puedan ayudar. Por otra parte, nuestras visualizaciones aún tienen amplias áreas de mejora, principalmente en el ámbito técnico.

Existen distintas formas de usar marcadores. Nosotros, por ahora, solo hemos utilizado marcadores «estándar», para los cuales ya están preprogramadas las herramientas. Sabemos de la existencia de técnicas, unas más complejas que otras, para usar marcadores personalizados, o incluso varias copias del mismo marcador ubicadas de manera distribuida dentro de la escena real para que, aunque uno de ellos quede oculto para la cámara (mientras alguien atraviesa caminando, por ejemplo), los demás no, y así no se interrumpa la visualización.

Por otro lado, hasta ahora solo hemos logrado realizar la interacción con las visualizaciones a través de los marcadores impresos. Creemos que la verdadera esencia de la RA es combinar objetos reales con la información digital que se añade a la escena, es decir, una de nuestras metas es que objetos reales funcionen como disparadores para las visualizaciones, en vez de los marcadores que actualmente usamos. Esta característica, además de hacer a las visualizaciones mucho más atractivas, creemos que tiene el potencial de conferirles un nivel de interacción más natural.

En vez de sostener un patrón impreso frente a la cámara, ahora un alumno o el profesor sostendrían, por ejemplo, algún objeto conductor con forma esférica, cargado y aislado, que una vez detectado por la cámara, mostraría a su alrededor las mismas líneas de campo eléctrico.

También somos conscientes de que no en todos los salones de una universidad existe conexión a internet para poder acceder a las páginas web que alojan actualmente nuestras visualizaciones, por ello estamos investigando la posibilidad de que la RA que desarrollamos pueda ser ejecutada desde cualquier computadora o dispositivo, con solo tener los archivos necesarios descargados.

Los detalles visuales, como sombras, resolución, etcétera, también son aspectos que constantemente buscamos mejorar para que nuestras visualizaciones sean más claras y atractivas en comparación con los dibujos en el pizarrón o en los libros de texto.

Conclusiones y perspectivas

Los resultados, dificultades y áreas de mejora que aquí presentamos dan cuenta de los primeros resultados de un proyecto que intenta mejorar la experiencia de los alumnos de ICO al cursar la asignatura de EyM y su entendimiento de las ecuaciones de Maxwell, así como los principales fenómenos y conceptos físicos que se les asocian.

La implementación de RA en el PEA supone un buen dominio tecnológico, sobre el cual trabajamos de manera constante, y, al mismo tiempo, un entendimiento de sus alcances y limitaciones en la docencia, lo cual buscamos entender con el apoyo de los alumnos de Pedagogía.

Este proyecto se enriquece principalmente con las propuestas de los propios alumnos interesados en abordar esta situación desde sus respectivas áreas de conocimiento (ICO y Pedagogía), en conjunto con sus profesores.

Buscamos que la creación de estas visualizaciones no solo se limite a la mera «transcripción» de un diagrama o dibujo de un libro a la RA. El potencial impacto de la RA sobre los procesos de análisis y abstracción de los alumnos que la utilicen para estudiar conceptos del electromagnetismo dependerá de una adecuada didáctica y teorización en clase, de tal forma que las visualizaciones representen un apoyo al PEA y no la parte central de este.

Los alumnos seguirán siendo receptores de la información si no logramos que participen en la construcción conjunta del conocimiento. Por esta razón, buscaremos hacer que ellos participen, elaborando sus propias visualizaciones y la explicación que las acompaña, y sin que esto implique ocupar más tiempo del disponible para el curso de la materia.

En nuestra búsqueda por mejorar la experiencia y entendimiento del estudio del electromagnetismo tenemos mucho trabajo por delante y contamos como reto principal utilizar la tecnología de manera creativa y eficiente.

Bibliografía

- AZUMA, R. T. (1977): «A Survey of Augmented Reality», *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 6, n.º 4, pp. 355-385.
- BLÁZQUEZ-SEVILLA, A. (2017): *Realidad aumentada en educación*, Gabinete de Tele-Educación del Vicerrectorado de Servicios Tecnológicos de la Universidad Politécnica de Madrid.
- CÓZAR-GUTIÉRREZ, R.; M. DEL VALLE DE MOYA-MARTÍNEZ, J. A. HERNÁNDEZ-BRAVO y J. R. HERNÁNDEZ-BRAVO (2015): «Tecnologías emergentes para la enseñanza de las Ciencias Sociales. Una experiencia con el uso de Realidad Aumentada en la formación inicial de maestros», *Digital Education Review*, n.º 27, pp. 138-153.
- MARTÍNEZ-HUNG, H.; A. GARCÍA-LÓPEZ, O. QUESADA-GONZÁLEZ e I. ALMENARES-VERDECAS (2019): «Realidad aumentada en la enseñanza

de la química de coordinación y estructura de sólidos», *Atenas. Revista Científico Pedagógica*, vol. 2, pp. 111-125.

PURCELL, E. y D. MORIN (2013): *Electricity and Magnetism*, Cambridge: Cambridge University Press.

TORRE-CANTERO, J. DE LA; N. MARTIN-DORTA, J. L. SAORÍN-PÉREZ, C. CARBONELL-CARRERA y M. CONTERO-GONZÁLEZ (2013): «Entorno de aprendizaje ubicuo con realidad aumentada y tabletas para estimular la comprensión del espacio tridimensional», *RED. Revista de Educación a Distancia*, año XII, n.º 37, abril, Murcia, <<http://www.um.es/ead/red/37>> [14/1/2019].



Resultados del PROCOLER en un sitio web

J. MAYORGA BUCHELLY,* N. ARIAS ÁVILA,* VERÓNICA TRICIO GÓMEZ**

Introducción

Desde hace años se conocen incuestionables evidencias de que el esquema actual de producción de energía, basado en combustibles de origen fósil, es insostenible, altamente vulnerable y dependiente de la existencia ya menguada de recursos fósiles. Además, se ha comprobado que el consumo desmesurado e irracional de la energía y el empleo indiscriminado de estos combustibles tienen efectos nocivos sobre el ambiente.

Por ello, es clara la necesidad de modificar cuanto antes el modelo energético vigente, sustituyendo de manera paulatina el empleo de estos combustibles por otras fuentes que no tengan inconvenientes a corto plazo y generando, además, un cambio radical en el ahorro y uso racional de la energía (Gutiérrez y Gutiérrez, 2009).

Al ser incuestionable la importancia de la energía para el desarrollo sostenible, a la educación le corresponde una parte esencial e insustituible en los cambios que se requieren de mentalidad y de actitudes de la sociedad respecto de aquella. En el marco de una educación que favorezca la transición a la sostenibilidad, se hace necesario enseñar energías renovables (ER) particularmente en los niveles básico y medio de educación.

* Licenciatura en Física, Universidad Distrital, Bogotá, Colombia.

** Departamento de Física, Universidad de Burgos, España.

Por ello, se busca implementar propuestas afines, que atiendan los requerimientos de los niveles de enseñanza mencionados, y utilizar los sitios web que se han convertido en una herramienta importante en la educación por contribuir a la construcción de los procesos de aprendizaje del estudiantado, y que han sido incorporados en las escuelas dado su impacto actual. Se ha trabajado en los contenidos para los tópicos habituales de las energías renovables y temas relacionados integrando de manera transversal gran parte de las materias o asignaturas de los programas escolares, paralelamente se ha implementado el uso de las TIC (tecnologías de la información y la comunicación) mediante la construcción de un sitio web.

1. PROCOLER y la CEER

El proyecto colaborativo en energías renovables PROCOLER tiene como objetivo incentivar un cambio en el modelo energético actual, que emplea fuentes fósiles como principal recurso, y en su lugar fomentar el uso de fuentes de ER para suplir las necesidades del desarrollo de la sociedad actual. Este nuevo modelo energético tiene como premisa la enseñanza de las ER en los planes curriculares, como eje integrador de las asignaturas básicas de la formación educativa desde temprana edad. Teniendo en cuenta esto, se hace necesaria la creación de herramientas didácticas que orienten el proceso de enseñanza-aprendizaje.

De aquí surge la propuesta contenida en la Cartilla para la Enseñanza de las Energías Renovables (CEER) (figura 1) (Arias y Tricio, 2013), que toma contenidos de las ER de forma transversal a los temas del plan de estudios por medio de ejercicios, laboratorios y construcción de dispositivos caseros, mediante los cuales se muestra al estudiante que puede ser partícipe de una posible solución a las problemáticas ambientales existentes en la actualidad.

La finalidad de la Cartilla es abordar la enseñanza de las ER y temáticas afines con un enfoque diferente e innovador, mediante una metodología en la que se trabaje de forma colaborativa, multidisciplinar y transversal, en los niveles educativos de la enseñanza básica y el bachillerato.



Figura 1. Portada y contraportada de la Cartilla para la Enseñanza de las Energías Renovables.

Fuente: <<http://www.e-libro.net/libros/libro.aspx?idlibro=1274>>.

2. Implementación de la CEER

Se han vinculado al proyecto algunos colegios, entre los cuales vale la pena destacar al San Pedro y San Felices, y Jesús María, ambos de Burgos, España, y al colegio Marco Antonio Carreño Silva, de Bogotá, Colombia, con la participación de docentes de distintas asignaturas (Arias y Tricio, 2015). Son múltiples las herramientas que se han desarrollado en el marco de la implementación de la CEER: encuestas, cuestionarios a estudiantes y docentes, mapas mentales, mapas conceptuales, entre otras, además de consultar información en documentos institucionales, como el plan de estudios, relacionada con las ER y temas afines. Lo anterior se hace con el fin de analizar y dar seguimiento al proceso de enseñanza-aprendizaje de las actividades propuestas en la Cartilla, como son la construcción de dispositivos de bajo costo, laboratorios, ejercicios, entre otros (figura 2).

Los resultados de la información recolectada de diferentes materiales (encuestas, entrevistas, etc.) se analizaron para inferir si hubo o no aprendizaje significativo en los estudiantes, en cuanto al conocimiento y los conceptos básicos sobre las ER como uno de los objetivos de la implementación.



Figura 2. Dispositivos caseros y folletos elaborados por los estudiantes en clase. Colegio Marco Antonio Carreño Silva, Bogotá.

3. Construcción de un sitio web

El sitio web surge a partir de la necesidad de implementar las temáticas de la CEER a través de herramientas virtuales, cada vez más incorporadas en las instituciones educativas, y que han sido nuevas formas de interacción entre los docentes y estudiantes, gracias a las llamadas comunidades virtuales, donde es posible recoger diversos tipos de material o recursos útiles, que pueden implementarse en la enseñanza y enriquecer el aprendizaje en el aula de manera significativa (Briceno y Bastidas, 2008).

De acuerdo con lo anterior, el sitio web, como parte de la implementación del PROCOLER, inició su construcción centrado principalmente en la divulgación y enseñanza de las energías renovables, y aún está en desarrollo; para ello se ha empleado la plataforma Joomla! en su versión 3.1.

La plataforma Joomla! (Joomla Content Management System – CMS–©, 2005-2019, <https://www.joomla.org/>) es un sistema interactivo para la creación de sitios web dinámicos y de *software* libre, que cuenta

con una interfaz sencilla de manejar, lo cual posibilita a cualquier persona administrar sus propios contenidos sin necesidad de tener conocimientos amplios sobre diseño web. Cuenta con una amplia gama de herramientas que permiten diseñar sitios web con alto contenido de texto, imágenes, vínculos, música y archivos multimedia en general, además de las llamadas «extensiones», que contemplan plantillas, paquete de idiomas y complementos (*plug-in*), utilizados para garantizar un óptimo desempeño del sitio web y vincular la información con los contenidos relevantes. Joomla! también es considerado un sistema para la creación de entornos educativos gracias a su versatilidad para posibilitar acciones pedagógicas de forma única y relativamente sencilla, garantizando experiencias en comunidades virtuales (Sánchez y Ruiz, 2012).

4. Diseño y estructura del sitio web

Se presenta a continuación la estructura básica del sitio web. Inicia desde la portada (figura 3), que permite acceder a una introducción general, con una breve descripción de las fuentes energéticas más empleadas en la actualidad (combustibles fósiles), y una explicación del porqué su uso ha conllevado a diferentes problemáticas medioambientales y cómo las energías renovables pueden ser incorporadas en la educación, desde diferentes aspectos, como una de las posibles soluciones a dichas problemáticas.



Figura 3. Portada del sitio web.

El sitio web comprende cuatro secciones principales. La primera sección, llamada «Las fuentes de energías renovables» (figura 4), contiene información histórica y general sobre cada una de las fuentes de energía, su definición, clasificación, etc., con énfasis en los diferentes dispositivos que las emplean y conceptos científicos básicos para su entendimiento. Se presenta, además, una serie de enlaces de descarga

de información (diversos materiales) que complemente el contenido de lo tratado.



Figura 4. Sección «Las fuentes de energías renovables».

La segunda sección, «Sala de profesores» (figura 5), se enfoca principalmente en la enseñanza de las energías renovables a partir del contenido de una serie de herramientas didácticas diseñadas con el fin de brindar a docentes de varias asignaturas el acceso a diversas actividades para el aula, siguiendo la metodología de la CEER.



Figura 5. Sección «Sala de profesores».

Estas actividades se encuentran en el sitio web como material didáctico descargable que comprende fichas didácticas, dispositivos para desarrollar en el aula, laboratorios y ejercicios relacionados con las ER. De igual manera, se presentan los enlaces donde pueden consultarse algunas propuestas didácticas sobre la enseñanza de las ER, entre ellas la contemplada en la CEER.

Las fichas didácticas para el docente constan con una serie de actividades prácticas enfocadas desde cada asignatura (Biología, Español y Literatura, Física, Inglés, Matemáticas, Sociales –Geografía e Historia–, Tecnología e Informática, etc.) en torno a alguna temática de las ER, en las que se sugiere desarrollar la construcción de dispositivos caseros en diversos espacios con el material adecuado en conjunto con los laboratorios (figuras 6). Las fichas están clasificadas de acuerdo con la temática principal, es decir, respecto al tipo de ER, y contienen la siguiente estructura:

1. Introducción a la ficha.
2. Enfoque desde diferentes disciplinas.
3. Hacerlo en clase: actividades.
4. Lecturas complementarias.
5. Notas.
6. Bibliografía.

Cada ficha presenta una breve introducción sobre la importancia de abarcar las energías renovables en las diversas disciplinas y la temática a tratar de las ER en concreto. Posteriormente, se mencionan algunos de los conceptos y términos pertinentes que se tratan en cada una de las asignaturas básicas relacionadas con la temática, con el fin de orientar al docente en la elección de los contenidos que están en el plan curricular del nivel de los estudiantes.



Figura 6. Acceso en el sitio web para descargar las fichas didácticas.

Las actividades de las fichas se presentan con unos objetivos concretos, algunas figuras predeterminadas y con un desarrollo establecido, sin que exista necesariamente una única forma de realizarlas. Al final de

cada ficha se sugiere material complementario (lecturas, artículos, videos, etc.) de tipo divulgativo y científico, con el cual el docente puede plantear varios trabajos a los estudiantes, bien sea en el aula o como tarea extraclase.

Otra herramienta que se propone son los Laboratorios. Estos se dividen en: laboratorios directos sobre las ER, espacio en el que se encuentran prácticas relacionadas principalmente con los dispositivos caseros construidos, y laboratorios indirectos, espacio en el que se presentan y sugieren prácticas que involucran conceptos fundamentales en el estudio de diferentes disciplinas como Física, Química y Biología, entre otras, orientadas a fenómenos relacionados con las ER. Al igual que las fichas, los laboratorios están disponibles como material descargable y contienen la siguiente estructura (figura 7):

1. Introducción.
2. Materiales.
3. Objetivo.
4. Procedimiento.
5. Mediciones y cálculo.
6. Actividad complementaria.
7. Lecturas complementarias.
8. Enfoque desde otras asignaturas.
9. Bibliografía.

Asimismo, los laboratorios presentan una breve introducción enfocada en la temática a tratar y relacionada con los conceptos científicos implícitos. Posteriormente se mencionan y se ilustran los materiales a utilizar, los cuales, por lo general, son de bajo costo.

Este material también contempla una serie de objetivos concretos para abordar el laboratorio, su respectivo procedimiento, mediciones y cálculos a desarrollar. Se le propone al docente que estos laboratorios contribuyan a la formulación de hipótesis por parte de los estudiantes y, además, que no se desarrollen siguiendo un tipo de «receta» o «paso a paso». También se presenta una actividad complementaria que comprende diferentes tareas extraclase y algunos enlaces para consultar lecturas acordes al nivel del estudiante. Por último, se menciona un enfoque desde otras asignaturas, que sugiere la posibilidad de desarrollar las prácticas en conjunto con aquellas, de acuerdo con las temáticas.

En la cuarta sección, «Sala de debate», se dispondrá de una gama de herramientas de comunicación gracias a las cuales el usuario tiene la oportunidad de interactuar con las personas interesadas en algún tema particular de los mostrados en el sitio web. Las principales herramientas son un foro ambiental y un blog interactivo estudiantil, en los que el internauta puede proponer algún tema o artículo de su interés para compartir su experiencia con otros usuarios del sitio web.

De manera adicional, este espacio comprende un foro de profesores, donde los docentes de diferentes áreas del conocimiento pueden aportar sus experiencias en el aula a modo de diario de campo, para que sus colegas estén al tanto de las nuevas metodologías de aprendizaje enfocadas en las ER y cómo estas son desarrolladas actualmente en Colombia y el mundo.

En el siguiente enlace se puede acceder al diseño, la estructura y el contenido del sitio web: <<http://200.69.103.88:3105/procoler2/index.php/home>>.

Conclusiones

El PROCOLER, basado en la CEER, presenta un enfoque interdisciplinar como guía para el docente en el proceso de enseñanza-aprendizaje de las energías renovables y temas relacionados en la educación media.

En este trabajo se plantea una metodología didáctica centrada en el trabajo colaborativo y transversal, que involucra a las TIC y posibilita a los estudiantes ubicar a las ER relacionándolas con las diferentes asignaturas de su formación y con su vida cotidiana.

Los resultados obtenidos en cuanto al diseño y la estructura del sitio web (aún en construcción) permiten una mejor navegabilidad en el acceso a los diversos contenidos allí propuestos.

El diseño y la construcción de las actividades propuestas en el material didáctico, fichas y laboratorios son herramientas que no implican una única línea de desarrollo, sino que permiten acoplarse de acuerdo con las necesidades de cada docente de las diversas disciplinas y del grupo de estudiantes.

Se ha concebido un sitio web dirigido principalmente a usuarios que sean partícipes del proceso de enseñanza-aprendizaje de las energías renovables en calidad de estudiantes o docentes de diferentes instituciones educativas. En él se podrá consultar de forma asequible información

relacionada tanto con las energías renovables como con su enseñanza y temas relacionados. Puede resultar de interés también para usuarios que requieran consultar contenidos determinados de información general sobre aspectos divulgativos de las fuentes de energías renovables empleadas en la actualidad.

Bibliografía

- ARIAS, N. y V. TRICIO (2013): *Cartilla para la enseñanza de las energías renovables*, Burgos: Editorial Servicio de Publicaciones e Imagen Institucional.
- ARIAS, N. y V. TRICIO (2015): «Propuesta multidisciplinar y cooperativa: energías renovables en Secundaria», *Actas del III Congreso de Docentes de Ciencias de la Naturaleza*, Madrid: Editorial Santillana, pp. 35-41. ISBN: 974-84-680-3013-5.
- BRICEÑO, S. y J. BASTIDAS (2008): «El uso de la página web como herramienta pedagógica para la enseñanza de la geografía», *Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal (REDALYC)*, vol. 13, n.º 2, p. 250.
- GUTIÉRREZ, C. y C. GUTIÉRREZ (2009): *La actuación frente al cambio climático: guía para un consumo sostenible*, Universidad de Murcia.
- SÁNCHEZ, J. y J. RUIZ (2012): «Joomla!: la web en entornos educativos», Instituto Nacional de Tecnologías Educativas y de formación, <<http://tecnologiaedu.uma.es/materiales/joomla/modulos1-3.pdf>> [13/1/2019].



El *software* en el laboratorio de Física, una alternativa para el desarrollo de competencias profesionales

BEATRIZ CONSUEGRA LEZCANO,* MARGARITA
LIBERTAD MIRANDA DEL REAL,** LEONARDO CECILIANO
HERNÁNDEZ,** ERNESTO MILLARES RODRÍGUEZ**

Introducción

La formación de ingenieros no puede estar ajena a la sociedad en que han de desarrollarse profesionalmente, caracterizada por una tecnología que cambia a una velocidad vertiginosa en las distintas áreas del conocimiento y por una exigencia nacional e internacional de profesionales muy competentes y con una formación científica profunda, a partir de la cual se podrán especializar según el contexto social y cultural donde deban trabajar.

Sin embargo, en los primeros años de estas carreras es frecuente la deserción, los bajos rendimientos docentes, así como escasa motivación, lo que, por lo general, es causado por poca preparación en las asignaturas de ciencias básicas como Matemática, Física y Química. Esta situación ha motivado múltiples investigaciones en la enseñanza de esas ciencias.

En correspondencia con lo anterior, la enseñanza de la Física en las universidades integra propuestas para incentivar y evidenciar la importancia de esta disciplina como conocimiento básico en las carreras de ciencias técnicas, en la que converge la necesidad de una comprensión de los procesos, fenómenos y leyes, así como los procedimientos matemáticos precisos, aspectos que le dan cierta complejidad.

* Departamentode Ingeniería Mecánica, Universidad de Matanzas, Cuba.

** Departamento de Desarrollo de Recursos para el Aprendizaje, Universidad de Matanzas, Cuba.

*** Departamento de Ingenierías, TecNM/Tecnológico de Toluca, México.

La disciplina Física incluye el trabajo en el laboratorio, que posibilita al estudiante gestionar su aprendizaje, y si se integra el uso de *software* se contribuye a generalizar procedimientos didácticos, potenciando la observación de fenómenos físicos, lo que favorece la integración de los conocimientos precedentes con los nuevos, potencia el aprendizaje significativo y el desarrollo de competencias profesionales.

Desde esta perspectiva, y por la importancia de implementar estrategias que conduzcan a enriquecer las prácticas pedagógicas, se expone una experiencia que tiene como objetivo utilizar *software* en los laboratorios docentes de Física, para potenciar el aprendizaje significativo y el desarrollo de competencias profesionales. Esta se desarrolla en el Tecnológico Nacional de México, «Tecnológico de Toluca», en la carrera de Mecatrónica, específicamente en la asignatura Vibraciones Mecánicas. A través de los *software Solidworks* y *GeoGebra* los estudiantes realizan la simulación de los fenómenos que son estudiados en Física y con posterioridad en Vibraciones Mecánicas.

El trabajo desde este enfoque de la utilización de las TIC ha permitido una mayor motivación en los estudiantes, lo que contribuye a comprender mejor los fenómenos mecánicos y posibilita generalizar e integrar procedimientos y conocimientos que promueven una enseñanza más profunda y consciente, y potencian el desarrollo de competencias profesionales.

Además, se confeccionaron materiales didácticos que contribuyen a la solución parcial de la falta de equipamiento de los laboratorios en las universidades en los distintos contextos geográficos.

Desarrollo

Las condiciones actuales del desarrollo de la ciencia y la tecnología han potenciado nuevos paradigmas educativos. En este contexto, las universidades, encargadas de la formación de profesionales capaces de responder a las nuevas exigencias del mundo contemporáneo, han promovido un modelo educativo que desarrolle competencias profesionales, desde una educación más abierta, flexible, permanente, con nuevas formas de generación y aplicación del conocimiento y vinculada con los sectores productivos citados por Vega (2005).

La implementación de la formación basada en competencias precisa de un diseño o rediseño curricular centrado en el aprendizaje y no en

la estructura de las disciplinas científicas; se requiere que estas contribuyan desde el contenido a potenciar formas de generación y aplicación del conocimiento, la creatividad y la innovación en nuevos contextos de aprendizaje más allá del aula. En este sentido, la UNESCO recomendó que los estudiantes tuvieran espacios para aprender a ser, a pensar, a hacer, a aprender, a respetar y a convivir (UNESCO, 2018), enfatizando en que la educación superior no es solo para formar profesionales, lo cual incide en el saber conocer y el saber hacer, sino también para desarrollar el saber ser y el saber convivir (estar) de los estudiantes.

Desde el enfoque de la formación basada en competencias, el énfasis no está en los estudiantes, ni tampoco en los docentes, sino en la relación intersistémica de ambos (Tobón, s. f.).

En esa interrelación el docente deberá acercar lo más posible la enseñanza-aprendizaje al contexto laboral de los futuros profesionales y para esto es importante enriquecer las prácticas pedagógicas con variados métodos de enseñanza. Estos deben considerar en el aprendizaje, como señala Castellanos (2014), la dialéctica entre lo histórico-social y lo individual-personal, en la que se desarrolla un proceso activo de reconstrucción de conocimientos y descubrimiento del sentido personal y la significación vital para los sujetos, se construyen conocimientos, destrezas, capacidades, y es una fuente de enriquecimiento afectivo que propicia la formación de sentimientos, valores, convicciones.

De acuerdo con lo antes planteado, se requiere de capacitación y de un aprendizaje que lleve a la reflexión, en el que el profesor analice los logros que va obteniendo y, según las dificultades que detecte y en consecuencia con el contexto académico en que se desarrolle, se generen estrategias de aprendizaje para lograr mejores resultados. En este sentido, se asume como «competencia» el conjunto de conocimientos, procedimientos, destrezas y actitudes combinados, coordinados e integrados en la acción, que resultan necesarios para garantizar un adecuado desarrollo profesional. Se adquieren a través de la experiencia que permite al individuo resolver problemas específicos de forma autónoma y flexible y ser capaz de colaborar en el entorno profesional y en la organización del trabajo en contextos singulares (Jiménez, Hernández y Alfonso, 2013).

Esta definición precisa la integración de los conocimientos, procedimientos y actitudes, rasgos que deben caracterizar a un egresado universitario para que pueda desarrollar con éxito su actividad profesional; a la vez que señala la capacidad de colaborar en el entorno

profesional y reconoce la flexibilidad, aspectos que son considerados en este trabajo.

Como complementos a la definición planteada, también serán referentes los rasgos característicos de las competencias presentadas (Concesa, Rodríguez y Moreira, 2011):

- Carácter holístico e integrador, ya que conocimientos, capacidades, actitudes, valores y emociones no se pueden entender de manera separada.
- Carácter contextual, pues las competencias se concretan y desarrollan vinculadas a la diversidad y complejidad de las acciones.
- Dimensión ética, dado que requieren actitudes, valores y compromisos que los sujetos van adoptando a lo largo de la vida.
- Carácter creativo de la transferencia, que debe entenderse como un proceso de adaptación creativa en cada contexto.
- Carácter reflexivo, en tanto que suponen un proceso permanente de reflexión para armonizar las intenciones con las posibilidades de cada situación.
- Carácter evolutivo, en la medida en que se desarrollan, perfeccionan, amplían o se deterioran y restringen a lo largo de la vida.

De acuerdo con esto, Tobón (s. f.) señala que hay dos conceptos que dan cuenta de los pasos esenciales por medio de los cuales se da la docencia estratégica: conocimiento y autorregulación.

Conocimiento implica para el docente hacer parte del aprendizaje a los estudiantes. Esto se concretiza en un permanente diagnóstico de cómo se forman las competencias, orientando a cada estudiante para que, a su vez, se autodiagnostique. Por su parte, la autorregulación incluye tres acciones: planear, monitorear y valorar.

Los perfiles de egresados de la educación superior plantean que los graduados deben ser capaces de procesar información, relacionar lo aprendido, saber actuar reflexiva y responsablemente, así como solucionar problemas en el área específica de su profesión.

Por lo tanto, los docentes deberán acercar lo más posible la enseñanza-aprendizaje a la formación de estos rasgos, lo cual constituye un reto con respecto a las formas tradicionales de concebir la ense-

ñanza. No se puede negar que, en las insuficiencias de los estudiantes, también los docentes tienen responsabilidad.

En el caso de la Física, algunas veces se presenta excesiva teoría, faltan herramientas que ilustren de manera práctica y precisa los fenómenos y se manifiesta falta de investigación para la enseñanza. Sin embargo, la Física puede desarrollar la enseñanza apoyada en el trabajo experimental, en el uso de *software* que conduzcan al estudiante a emplear una amplia gama de conocimientos básicos (matemáticos y físicos y, en este caso, de computación), realizar análisis de datos, formular hipótesis. Esto le permite accionar sobre un referente empírico, facilitando que su campo conceptual se estructure y enriquezca, en particular en términos de modelos de utilización de los conceptos (Agudelo y García, 2010).

Aunque se han presentado algunos elementos conceptuales de las competencias, es importante precisar que el modelo de competencias no ofrece estrategias de trabajo al docente (Fuentes, Agudelo y Díaz-Barriga, 2006), pero estas se pueden reconstruir del modelo «escuela activa» o «escuela nueva»; se busca que el estudiante se formule interrogantes, pero sobre todo que asuma el reto de resolverlas (Fuentes, Agudelo y Díaz-Barriga, 2006). De ahí la importancia de que el docente no solo domine el saber científico de la enseñanza, ni solo se apoye en las teorías cognitivas o del aprendizaje que le permitan explicar cómo es el proceso de construcción del conocimiento por parte de un sujeto, sino que tenga una adecuada formación en el debate didáctico contemporáneo, para que pueda formular una situación de aprendizaje que articule problemas del contexto con saberes.

La clave para lograrlo se encuentra en varios métodos de enseñanza, como el análisis de casos, el desarrollo de proyectos y el aprendizaje basado en problemas, entre los más representativos. De acuerdo con Fuentes, Agudelo y Díaz-Barriga (2006), solo mediante una enseñanza basada en problemas se logrará preparar a los estudiantes para contender con éxito en los distintos contextos de la vida real, con una visión sistémica, conocimiento formal, experiencia, creatividad, práctica y juicio. Es decir, un alto nivel de desempeño en la competencia profesional.

Desde una visión cognitiva más actual, la teoría del aprendizaje significativo supone una alternativa en el desarrollo de las competencias y representa un referente idóneo y eficaz para la formación profesional. En el presente trabajo también se asume esa teoría.

Se realiza una propuesta, sustentada en los criterios anteriores, para el uso de *software* en el laboratorio docente que contribuya al desarrollo de competencias profesionales. Esta experiencia se desarrolla en una unidad de la asignatura Vibraciones Mecánicas, que tiene como precedentes las asignaturas Estática, Dinámica, Ecuaciones Diferenciales y los conocimientos básicos de Diseño Asistido por Computadora. Se pretende como resultado la consolidación de una estrategia didáctica para potenciar las competencias profesionales a partir del aprendizaje significativo de estudiantes de la carrera Ingeniería Mecatrónica.

Por las particularidades de la investigación, se considera que es esencialmente cualitativa, aunque se presentan análisis cuantitativos; es práctica y explicativa. Se aplicaron métodos teóricos y empíricos. Entre los primeros, se emplearon el método histórico-lógico, el análisis y la síntesis, así como el análisis de documentos y el método sistémico. Entre los empíricos se utilizó la observación, las encuestas y se realizaron pruebas a los estudiantes.

La experiencia se desarrolla en el grupo de cuarto año de Mecatrónica. Para poner en práctica la propuesta se elaboró un material didáctico que sirve de guía a los alumnos que cursan la asignatura Vibraciones Mecánicas. Este les permite reforzar y actualizar sus conocimientos físicos y fomentar sus competencias en la investigación bibliográfica, en la redacción y el diseño de estrategias y actividades de aprendizaje significativo vinculadas directamente con la evaluación; así como incrementar la eficiencia en el aula y construir mejores escenarios para el diseño e integración de sistemas mecatrónicos basado en el aprendizaje significativo. En el área de ingeniería les permitirá aplicar los conocimientos integrales adquiridos durante su formación a fin de seleccionar el *software* adecuado para el diseño de los diferentes sistemas mecánicos, así como para la realización de los cálculos por el método analítico y la simulación con ayuda de *software*.

Para el desarrollo de las prácticas de laboratorio con este enfoque fue necesario modificar las tradicionales y sus guías, de tal manera que estas fuesen promotoras de conocimiento y no solo retroalimentadoras de un aprendizaje mecánico.

El referido material es de gran ayuda para los profesores que imparten la materia, ya que los alumnos serán capaces de generar criterios para el análisis de los fenómenos relacionados con las vibraciones mecánicas y podrán aplicarlos en el diseño de sistemas eléctricos,

electrónicos, electromecánicos y mecatrónicos que se encuentran en su entorno laboral.

Se proponen en el desarrollo de la estrategia didáctica, los objetivos relacionados a continuación:

- Diseñar con ayuda de *software* materiales educativos para la enseñanza de vibraciones mecánicas.
- Analizar *software* libre con la intención de adaptarlo en el diseño de sistemas mecánicos para el análisis de vibraciones mecánicas de un grado de libertad.
- Elaborar guías didácticas para la realización de actividades experimentales donde se consideren los diseños realizados usando *software*.
- Realizar el estudio de movimiento de sistemas mecánicos de un grado de libertad, tanto por el método analítico como por el de simulación.
- Hacer un análisis comparativo entre los resultados obtenidos por el método de simulación y el analítico de las vibraciones que experimentan los sistemas mecánicos seleccionados.

Para medir la efectividad de la propuesta de estrategia se declaran tres dimensiones: cognitiva, procedimental y actitudinal.

La dimensión cognitiva comprende:

- Nivel de conocimientos conceptuales precedentes de Física.
- Nivel de conocimientos sobre el *software*.
- Nivel de conocimientos de las aplicaciones físicas.
- Nivel de conocimientos para hacer la simulación.

Por su parte, la dimensión procedimental incluye:

- Nivel de desarrollo de habilidades para la solución de problemas de física.
- Nivel de desarrollo de habilidades con el *software*.
- Nivel de desarrollo de habilidades interdisciplinarias.
- Nivel de integración de métodos, procedimientos y vías de solución de un problema físico a través de un *software*.
- Nivel de sistematización de los resultados de las acciones planificadas.

Finalmente, la dimensión actitudinal abarca:

- Disposición para el desarrollo de la actividad.
- Propuesta de alternativas de soluciones ante las problemáticas que se presentan.
- Toma de decisiones y solución de la actividad.
- Propuesta de soluciones a partir de relaciones interdisciplinarias.
- Nivel de independencia en el desarrollo de la actividad.
- Nivel de creatividad en el desarrollo de la actividad.
- Satisfacción al alcanzar la solución de la actividad.
- Interés por la investigación.
- Modo de actuación en el desarrollo de las actividades conforme a las normas de comportamiento consciente y responsable.
- Demostración de sentimientos de colectivismo y compañerismo en las actividades que oriente el profesor.
- Participación sistemática en proyectos de laboratorio.

Se aplicó una prueba al inicio y al final de la estrategia, que incluyó problemas con conocimientos físicos precedentes y preguntas que por incisos presentaban diferentes situaciones; el estudiante debía proponer cuál *software* usar.

Se tiene especial cuidado con los conocimientos previos que poseen los estudiantes de la temática que se propone abordar, en este caso conceptos relacionados con las vibraciones mecánicas, que en la unidad analizada son los referidos a centro de masa, momento de inercia, leyes de Newton y energía mecánica.

La experimentación es una alternativa eficaz para la adquisición de conocimiento, promotora de aprendizaje significativo, siempre que las herramientas generen resultados contundentes para el entendimiento. Como aspectos importantes a tener en cuenta por parte del docente para este tipo de experiencias, se encuentran el manejo práctico de los recursos, conocimiento del *software* utilizado y el montaje experimental, lo que le permite al estudiante centrar su atención en los resultados y su análisis, y no en asuntos técnicos.

Por último, las guías de laboratorio ofrecen a los estudiantes dos tipos de información, una teoría corta, centrada y suficiente para la experimentación, y una idea introductoria a la investigación científica, particularmente en la toma correcta de datos, análisis estadísticos, gráficas y tendencias. Asimismo, les permiten extraer

conclusiones a partir de un ítem denominado «aspectos para tener en cuenta», el cual les sirve como guía para un análisis más centrado del fenómeno.

Durante la etapa inicial del curso Vibraciones Mecánicas, a pesar de que los alumnos ya habían cursado las asignaturas Estática, Dinámica, Ecuaciones Diferenciales y Diseño Asistido por Computadora, en las evaluaciones aplicadas se constata que presentaban serios problemas en el manejo de conceptos básicos de Física, necesarios para la comprensión de la actividad. En cuanto al dominio de las habilidades con el uso del *software*, se demostró en los resultados de la prueba diagnóstico que la mayoría podía dibujar las piezas (sistemas), pero no interpretar los resultados arrojados por el *software*. En nuestra opinión, esto se debe a que no habían aprendido conceptos básicos de la Física, como momento de inercia y centro de masa. Resulta curioso que en esta etapa la mayoría de los alumnos solo pueden utilizar las ecuaciones y realizar los cálculos.

En los documentos entregados como reporte de los resultados se aprecian errores en cuanto al uso de medios tecnológicos para expresar el lenguaje matemático, lo que pudiera hacernos pensar que no dominan la tecnología, pero en el caso de reportes manuscritos también existe esta dificultad; por citar un ejemplo, no saben distinguir entre las magnitudes vectoriales y escalares.

Los resultados de la experiencia mostraron que cuando se utiliza la estrategia de aprendizaje a partir de laboratorios los estudiantes recuerdan con facilidad los conocimientos previos necesarios. Se logra el objetivo perseguido con las prácticas en menor tiempo y de manera más eficiente porque están más motivados, sienten la necesidad de adquirir el conocimiento como fin en sí mismo, no de manera impuesta, lo que les permite buena disposición para el aprendizaje, que se evidencia en la participación activa en los procesos de experimentación, las preguntas que formulan y la calidad de los informes presentados.

En el laboratorio «tradicional» (retroalimentador, complementario a la clase) los informes que presentan los estudiantes son de menor calidad. Los conceptos no se recuerdan con facilidad, razón por la cual la experiencia de aprendizaje no es tan significativa como en la estrategia planteada inicialmente. Utilizan más tiempo, por lo que el esfuerzo para practicar y revisar disminuye notoriamente, por consiguiente, como señala Yépez (2011), el conocimiento no se

consolida lo suficiente como para constituir el fundamento adecuado del aprendizaje en secuencia.

La aplicación práctica de los conceptos de Física se convierte en un espacio pedagógico importante para que los estudiantes se acerquen a la realidad de los fenómenos, amplíen, consoliden, generalicen y comprueben los fundamentos teóricos de la disciplina y, además, adquieran habilidades propias de los métodos de investigación científica a través de la elaboración de informes en formato de publicación científica, ya que deben escribir ideas y sustentarlas de manera adecuada, entendible y razonable, hecho que aleja en gran medida al estudiante de enfatizar en los asuntos técnicos para centrarse en la física del fenómeno.

Conclusiones

La experiencia desarrollada en la asignatura Vibraciones Mecánicas con el uso de *software* en el laboratorio de Física permitió favorecer el aprendizaje significativo de los conceptos físicos utilizados en los primeros años de la carrera y potenciar el desarrollo de competencias profesionales.

Para lograr este propósito los docentes deben tener competencias pedagógicas y experiencias en el manejo de los equipos del laboratorio y el uso de *software*.

La elaboración de los informes de laboratorio en formato de publicación científica es una estrategia para que el estudiante desarrolle competencias. Es él quien ordena sus propias ideas y las escribe, construye su conocimiento con base en lo que ya sabe de una experiencia concreta y lo expresa tal como lo entiende, de modo que es posible evaluar en él la estrategia del docente.

Bibliografía

- AGUDELO, J. y G. GARCÍA (2010): «Aprendizaje significativo a partir de prácticas de laboratorio de precisión», *Latin-American Journal of Physics and Education*, vol. 4, enero, pp. 149-152.
- CASTELLANOS, D. (2014): «Sensibilización y preparación del docente: piezas claves para la atención educativa al talento», en A. Bazán y D. Castellanos (coords.), *La psicología en la educación: contextos de aprendizaje e investigación*, México: Plaza y Valdés Ediciones y Universidad Autónoma del Estado de Morelos, pp. 147-177, <<https://www.researchgate.net/publication/295855414>> [8/3/2017].

- CONCESA, C.; L. RODRÍGUEZ y M. A. MOREIRA (2011): «Aprendizagem significativa», *Meaningful Learning Review*, vol. 1, n.º 2, pp. 27-42.
- FUENTES, M.; J. AGUDELO y F. DÍAZ-BARRIGA (2006): «Enseñanza situada: vínculo entre la escuela y la vida», *Perspectiva educacional. Formación de profesores*, México: McGraw-Hill. <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=333328828008>> [26/2/2019].
- JIMÉNEZ, Y; J. HERNÁNDEZ y M. ALFONSO (2013): «Competencias profesionales en la educación superior: justificación, evaluación y análisis», *Innovación Educativa*, vol. 13, n.º 61, enero-abril, pp. 45-65.
- TOBÓN, S. A. (s. f.): «Aspectos básicos de la formación basada en competencias», <https://maristas.org.mx/gestion/web/doctos/aspectos_basicos_formacion_competencias.pdf> [18/11/2018].
- UNESCO (2018): «La educación superior en el siglo XXI», <http://www.education.unesco.org/educprog/wche/declaration_spa> [18/10/2018].
- VEGA, F. (2005): «Evaluación del desarrollo profesional de los jóvenes egresados cubanos ante los nuevos retos del mundo del trabajo», tesis de doctorado, Universidad de La Habana, <<http://cict.umcc.cu/>> [18/11/2018].
- YÉPEZ, M. A. (2011): «Aproximación a la comprensión del aprendizaje significativo de David Ausubel», *Revista Ciencias de la Educación*, primera etapa, vol. 21, n.º 37, Valencia, pp. 43-54.



Anexos



Anexo 1. Programa del VIII Taller Iberoamericano de Enseñanza de la Física Universitaria

Curso de actualización: Electromagnetismo

- Profesores: María Sánchez y Reinaldo Font, Universidad de La Habana, Cuba.
- Títulos de las sesiones:
 1. «Los “Maxwellianos”: el largo camino a las cuatro ecuaciones del electromagnetismo»
 2. «Simetría y su aplicación en las leyes de Gauss y Ampere al calcular E y B». Se presenta la utilización del concepto de «simetría» en la impartición de la relación entre los campos y las fuentes en el Curso de Electromagnetismo. Se incluye una recapitulación comparada de las propiedades de transformación de los vectores y pseudovectores. Se utiliza el concepto de «simetría» y su aplicación a los campos eléctricos y magnéticos (constantes en el tiempo) y se deducen las orientaciones de sus vectores característicos en casos sencillos.
 3. «De la sonda de Kelvin a la espectroscopía de fotovoltaje»
 4. «Magnetoelectricidad. Efecto magnetoeléctrico en el sistema cerámico PMN». Comúnmente en los cursos de Electromagnetismo de Física General el estudio de los materiales ferroeléctricos se basa en el BaTiO₃. Sin embargo, en la actualidad ganan espacio por sus posibles aplicaciones, mucho más ventajosas, nuevos materiales como los magnetoeléctricos. Se presentan las características fundamentales de estos materiales y la medición del efecto magnetoeléctrico en el sistema $\text{PbFe}_{1/2}\text{Nb}_{1/2}\text{O}_3$.

Conferencia inaugural

- Profesor: Fernando Rull Pérez, Universidad de Valladolid, España.
- Título: «Ciencia y tecnología en la aventura espacial: el caso de Marte».
- Resumen: exposición histórica de las misiones a Marte, detalle de las últimas misiones en las que estamos implicados y de los instrumentos que desarrollamos (la descripción tecnológica se hace a nivel divulgativo, pero es importante), implicaciones que tienen para el conocimiento del sistema solar y búsqueda de la vida extraterrestre.

Conferencias

1. Profesor: Daryl Manreza Paret, Universidad de La Habana, Cuba.
 - Título: «Cosmología en pregrado, ¿ser o no ser?»
 - Resumen: la cosmología, como parte de la ciencia, ha presentado en los últimos años un desarrollo sin precedentes, en gran parte gracias a la introducción de nuevos instrumentos que han permitido realizar observaciones detalladas del universo y también a la evolución de las simulaciones computacionales. La introducción de estos contenidos en un curso de pregrado presenta varios retos. En este trabajo se hace un análisis de los resultados más relevantes de la cosmología moderna y cómo estos podrían ser insertados en un curso introductorio.
2. Profesora: Gabriella Piccinelli Bocchi, Facultad de Estudios Superiores Aragón, UNAM, México D. F.
 - Título: «Cosmología: el arte de utilizar la ciencia para comprender el universo»
 - Resumen: proponemos integrar una materia de Cosmología en la etapa final del programa de estudios de la licenciatura en Física. La experiencia nos ha mostrado que el estudio del universo requiere utilizar conceptos de todas las áreas de la Física y de otras ciencias, y nos sugiere que una asignatura de Cosmología puede proporcionar a los estudiantes un

escenario donde relacionar y aplicar las distintas áreas del conocimiento físico y matemático adquirido en la carrera, así como iniciarlos en la investigación. Por otro lado, pensamos que para una comprensión adecuada de la cosmología es indispensable tener nociones de astronomía, pues estas resultan indispensables para entender tanto conceptos generales del universo como los fundamentos observacionales. Por ello, adicionalmente, proponemos la incorporación de una materia de Astrofísica General previa a la asignatura de Cosmología. En este trabajo se discuten esas ideas y se presentan ejemplos.

3. Profesor: Raúl Portuondo Duany, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez.
 - Título: «Carácter interdisciplinario de la Introducción a la Cosmología»
 - Resumen: la evolución de la materia desde el Big-Bang hasta el presente ha ido atravesando etapas cruciales cuyo análisis requiere detenerse en aspectos que son estudiados por diversas ciencias. La evolución del campo unificado físico inicial a partículas, galaxias, estrellas y planetas demanda analizar la física de dicho proceso. La formación de sustancias minerales y orgánicas a partir de los átomos formados por síntesis nuclear en el interior de las estrellas necesita, además, el análisis químico y geológico. La formación de moléculas orgánicas reproducibles y su evolución hacia gérmenes de vida bajo condiciones físicas y químicas adecuadas requiere del análisis biológico. La evolución de los seres vivos hasta el desarrollo de la cultura y la tecnología exige análisis biológicos y de carácter social, así como de las condiciones físicas propicias de manera sostenida por millones de años. Dentro de todo este espectro de ideas caben los análisis de tipo filosófico y religioso. Un Curso Introductorio de Cosmología implica estar abierto a todos estos análisis.
4. Profesor: César Eduardo Mora Ley, Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada (CICATA), Legaria, México D. F.

- Título: «La evolución del universo: la cosmología moderna y su importancia para la enseñanza de la Física»
 - Resumen: en esta conferencia mostramos una descripción general de la evolución del universo mediante los principales descubrimientos de la astronomía: la expansión del universo, la nucleosíntesis de elementos ligeros, el origen de la radiación cósmica de fondo y la formación de galaxias, así como la estructura a gran escala. Asimismo, discutimos los modelos cosmológicos clásicos para su inclusión en la instrucción superior. Finalmente, mencionamos algunas investigaciones educativas sobre errores conceptuales de alumnos de Astronomía, así como las propuestas modernas para la enseñanza de la Astronomía y la Cosmología, considerando los temas centrales de la ley de Hubble, la expansión del universo, la teoría del Big Bang y la materia oscura.
5. Profesor Friedrich Herrmann, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Alemania.
- Título: «Un nuevo enfoque de la teoría de la relatividad para principiantes»
 - Resumen: la cosmología se considera un campo especializado. Los temas cosmológicos apenas se abordan tanto en la escuela secundaria como en la universidad en las clases de Física Básica. Sin embargo, hay buenos argumentos para poner la Cosmología en primer plano. Esta tiene una base experimental sólida y en constante crecimiento. Y es emocionante. En nuestra opinión, debería formar parte de una educación física general. Se presenta una breve unidad didáctica que puede integrarse fácilmente en las clases de Física de la escuela secundaria o en el curso de Mecánica de la universidad.
6. Profesores: Carmen Carreras Béjar y Manuel Yuste, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), España.
- Título: «Ciencia y solidaridad en el más alto grado: María Sklodowska-Curie»

- **Resumen:** María Sklodowska Curie es una de las científicas más importantes de la historia, tanto por sus aportaciones al conocimiento científico como por su sentido de la responsabilidad y su compromiso social, que practicó durante toda su vida, desde su Polonia natal y hasta el final de sus días en Francia, su patria de adopción. A pesar de ser la única persona que ha obtenido dos Premios Nobel en dos modalidades diferentes, Física (en 1903) y Química (en 1911), y durante mucho tiempo, la única mujer científica conocida, su trayectoria personal y científica continúa siendo desconocida para la mayoría de los docentes de Física. Conocerla resulta particularmente importante en el caso de los profesores dedicados a la enseñanza secundaria, quienes son una pieza clave en la creación de vocaciones científicas, muy especialmente entre las jóvenes.

7. Profesora: Elena Vigil Santos, Universidad de La Habana. Cuba

- **Título:** «Nuestra atmósfera: pasado, presente y futuro»
- **Resumen:** el desarrollo de la vida en nuestro planeta ha estado dialécticamente ligado a los cambios en la atmósfera, en particular, a su composición. Se revisa de manera breve la historia de su evolución hasta el surgimiento de la vida humana. Se muestra cómo el hombre ha influido en las transformaciones de la atmósfera, la situación actual y la gran amenaza existente para sustentar la vida como la conocemos hoy; en especial, la supervivencia de la especie humana. A partir de la necesidad de la acción inmediata para controlar la composición de la atmósfera, determinante del cambio climático global, se muestran las soluciones posibles. Estas dependen en primer lugar de los gobiernos de cada país, sobre todo de los de países desarrollados, responsables los mayores consumos de energía per cápita y con margen amplio para ganar en eficiencia energética. Se enfatiza en la necesidad de educar e informar a las nuevas generaciones para que ganen conciencia de los peligros inminentes para la vida en el planeta y también para que modifiquen sus estilos de vida; pero, sobre todo, para que ejerzan presión sobre sus gobiernos, que deben adoptar las regulaciones y leyes, así como hacer las inversiones que se requieran.

8. Profesor: Guillermo Santana, Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM, México D. F.
 - Título: «Celdas solares de silicio negro con diferentes estados de pasivación superficial»
 - Resumen: se conoce que en las celdas solares de silicio cristalino los tratamientos superficiales son muy importantes y tienen gran relevancia en la eficiencia final de los dispositivos. «Celdas solares de silicio negro» es la terminología comúnmente utilizada para denominar la celdas solares de silicio cristalino con diferentes grados de textura superficial, recocido por plasma y combinaciones de diferentes películas como revestimiento anti-reflectante y de pasivación. En este trabajo preparamos células solares de silicio con diferentes grados de tratamiento químico de la superficie y recocidos por plasma (hidrógeno y amoniaco) con nitruro de silicio como revestimiento antirreflectante. Se midieron las curvas I-V de respuesta espectral, de superficie y de reflectancia en oscuridad y bajo iluminación. Los resultados se discuten en función de los distintos estados de pasivación.

9. Profesor: William Olarte Cortes, Facultad de Ciencias Básicas, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.
 - Título: «Aplicación de la metrología en Colombia a través del Grupo de Investigación en Metrología Bio-Eléctrica (GIMBE) de la Universidad Tecnológica de Pereira»
 - Resumen: los tratados de comercio que han globalizado la economía han exigido que la producción sea de mayor calidad y requiera un control más exigente; este es el campo de la metrología, que permite garantizar las exigencias de calidad del mercado. En esta conferencia se desarrolla el tema de la metrología desde sus inicios, mostrando una breve historia de esta disciplina a nivel mundial hasta su implementación y evolución en el eje cafetero colombiano.

Conferencia de clausura

- Profesor Augusto Beléndez Vázquez, Universidad de Alicante, España.

- Título: «James Clerk Maxwell y las ecuaciones que cambiaron el mundo»
- Resumen: en 1865 Maxwell publicó el artículo titulado «Una teoría dinámica del campo electromagnético», que contenía lo que hoy conocemos como ecuaciones de Maxwell, la predicción teórica de la existencia de las ondas electromagnéticas y la teoría electromagnética de la luz. Tras una breve referencia al papel fundamental de Young y Fresnel en la aceptación de la teoría ondulatoria de la luz, y a figuras como Oersted, Ampère y Faraday, que sentaron las bases del electromagnetismo moderno en el primer tercio del siglo xix, me centraré en la vida de James Clerk Maxwell, uno de los científicos más importantes de la historia de la física, así como en algunas de sus contribuciones a esta ciencia. Concluiré con la «síntesis» de Maxwell, ya en el último tercio del siglo xix, con la que unificó luz, electricidad y magnetismo, y permitió desarrollar la teoría de las ondas electromagnéticas, incluida la luz, así como abrir las puertas a dos de los cambios de paradigma más importantes de la física del siglo xx: la teoría de los cuantos de Planck y la teoría de la relatividad especial de Einstein.

Mesa redonda «Experiencias para introducir la Cosmología en la enseñanza de pregrado»

- Ponentes:
 - ◆ Profesor Raúl Portuondo Duany, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez.
 - ◆ Profesora Verónica Tricio Gómez, Facultad de Ciencias, Universidad de Burgos, España.
 - ◆ Profesor Juan Fuentes Betancourt, Facultad de Física, Universidad de La Habana, Cuba.
- Moderadora: profesora Carmen Carreras Béjar, UNED, España.

Calendario de presentaciones

Lunes 11 de marzo

Comunicaciones cortas

- Fernanda Santana Gómez, Universidad Central de Colombia: «Mecánica celeste del viaje a Marte con experimentos virtuales»

- Juan Gustavo Kessel Rodríguez, Universidad de Matanzas (Cuba): «El estudio de las ciencias espaciales con el apoyo de las TIC»
- Margarita Libertad Miranda del Real, Universidad de Matanzas (Cuba): «Webmedia de Astronomía para niños de enseñanza primaria»
- Diego Alamino Ortega, Dpto. de Formación Profesional Centro Universitario Enrique Rodríguez-Loeches Fernández, Universidad de Matanzas (Cuba): «Fórmulas vs. comprensión de la física; la epistemología al rescate»

Martes 12 de marzo de 2019

Comunicaciones cortas

- Pedro Uriel Martínez Martínez, Facultad de Estudios Superiores Aragón, UNAM (México D. F.): «Realidad aumentada en el estudio del electromagnetismo en la formación de ingenieros en computación»
- Félix I. Martínez Oliva, Facultad de Física, Universidad de La Habana (Cuba): «¿Cómo hacer sus propios videos docentes?»
- Andrés Solano García, Instituto de Farmacia y Alimentos (IFAL), Universidad de La Habana (Cuba): «Implementación de una *toolbox* en Wolfram Language para la enseñanza de la Física»
- Rosaimé González de los Reyes, Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echevarría (Cuba): «Experiencia sobre el desarrollo de habilidades experimentales en la asignatura de Física utilizando aplicaciones móviles»

Carteles

- Ernesto Millares Rodríguez, Universidad de Matanzas (Cuba): «La astrofísica, su aporte a la formación medioambiental del estudiante universitario»
- Fernanda Santana Gómez, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá (Colombia): «Modelo analítico alternativo sobre el día y la noche»
- Paco H. Talero, Dpto. de Ciencias Naturales Universidad Central (Colombia): «El infinito físico de Zenón, paradoja y sofisma en tres movimientos insólitos»

- Paco H. Talero, Dpto. de Ciencias Naturales Universidad Central (Colombia): «El Triqui cuántico como estrategia didáctica en la enseñanza de la Mecánica Cuántica»
- Juan Pedro Sánchez Fernández, Facultad de Ciencias, UNED (España): «El punto brillante de Denis Poisson, un apoyo inesperado a la difracción de Fresnel»
- Hugo Luyo Sánchez, Colegios Prolog, Jr., Lima (Perú): «Experimentos de Física sin guía»
- José Refugio Martínez Mendoza, Universidad Autónoma de San Luis Potosí (México): «Establecimiento de un laboratorio de microgravedad en vehículos suborbitales»
- Gabriella Piccinelli Bocchi, Centro Tecnológico Facultad de Estudios Superiores Aragón, UNAM, México D. F.: «La implementación de la realidad aumentada como generadora de nuevas formas de comprensión en electricidad y magnetismo»
- Rubén Mares Gallardo: Instituto Politécnico Nacional (IPN), México D. F.: «Vector de Runge-Lenz»
- Rubén Sánchez Sánchez Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada (CICATA), Unidad Legaria, México D. F.: «Aplicación del aprendizaje activo de la Física para estudiantes de bachilleres en Yucatán, México»
- María T. Pérez Maldonado, Facultad de Física, Universidad de La Habana (Cuba): «Introducing Milankovitch cycles in the course of Analytic Geometry»
- René Fundora Facultad de Física, Universidad de La Habana (Cuba): «Diez años de aplicación de una estrategia didáctica para la enseñanza de la Física en el Colegio Universitario de la UH»
- Julio Pedro Vázquez Conde, Facultad Preparatoria, Universidad de Ciencias Médicas de La Habana (UCMH) (Cuba): «Situación de salud e interdisciplinaridad en la enseñanza de la Física en Curso Premédico»
- Juan Antonio Alejo Díaz, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cuba): «Algunas reflexiones en relación con el Programa de Física General para carreras de ingeniería en los planes de estudio E con relación a sus dos primeras asignaturas impartidas»

- Beatriz Consuegra Lezcano, Universidad de Matanzas (Cuba): «El *software* en laboratorio docente de física, una alternativa para el desarrollo de competencias profesionales»
- Raúl León Suárez Dpto. de Ciencias Básicas, Facultad Introdutoria de la Universidad de las Ciencias Informáticas, La Habana (Cuba): «Diagnóstico sobre uso de las tecnologías en la evaluación del aprendizaje en Matemática y Física»
- Rafael García Cañedo, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echevarría (Cuba): «Una propuesta de innovación educativa en la enseñanza-aprendizaje de la Física. Impactos y retos»

Miércoles 13 de marzo de 2019

Comunicaciones cortas

- Verónica Tricio Gómez, Facultad de Ciencias, Universidad de Burgos (España): «*La temática sobre el universo en un máster de profesorado*»
- Arcelio Hernández, Dpto. de Física, Facultad de Ingeniería, Universidad de Cienfuegos (Cuba): «Algunas experiencias de la presentación de temas de cosmología en cursos de Física General»
- Manuel Yuste Llandres, Dpto. de Física Interdisciplinar, Facultad de Ciencias, UNED (España): «Augustin Jean Fresnel: 200 años de la teoría de la difracción de la luz»

Jueves 14 de marzo de 2019

Comunicaciones cortas

- Antonio José Berazaín Iturralde, Instituto Superior de Diseño (ISDi), Universidad de La Habana (Cuba): «Materiales y diseño: aspectos medioambientales y sociales. El caso del coltán»
- Jenny Ortega, Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Colombia): «Contenidos del PROCOLER en un sitio web»
- Luis Hernández García, Facultad de Física, Universidad de La Habana, Cuba. «Energía y medioambiente en la enseñanza de la Física universitaria»

- Raúl Portuondo Duany, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez: «Preocupación por el medioambiente en un Curso de Introducción a la Cosmología»

Carteles

- Giraldo Jiménez Chappotín, Universidad Nacional de Colombia, Unidad Palmira, Valle del Cauca (Colombia): «Desarrollo de la asignatura electiva Energía Solar, Actualización y Uso Final desde la perspectiva de la Física y su contribución a la formación de los ingenieros»
- Francisco Luis Pedroso Camejo, Universidad de Ciencias Pedagógicas Enrique José Varona,
- La Habana (Cubaa): «Educación energética sostenible para la formación del profesor de Física»
- Magaly Corrales Speck, Instituto Central de Ciencias Pedagógicas, La Habana (Cuba): «La formación de conceptos en las ciencias naturales con el empleo del experimento docente»
- Arnaldo Morey Ramos, Universidad de Matanzas (Cuba): «Propuesta didáctica para la enseñanza de la resolución de problemas de Física en carreras de ingeniería»
- Aymé Hernández Calzada, Departamento de Ciencias Básicas, Facultad n.º 2, Universidad de las Ciencias Informáticas, La Habana (Cuba): «Sistema de actividades dirigidas al desarrollo de la evaluación formativa en la enseñanza de la Física»
- José Miguel Marín Antuña, Facultad de Física, Universidad de La Habana (Cuba) «Reflexiones sobre la división de la docencia en conferencias, clases prácticas y seminarios»
- Carlos Ernesto Calvo Mola, Facultad de Física, Universidad de La Habana (Cuba): «Determinación de la constante de Planck mediante el uso de LED»
- Edwin Pedrero, Facultad de Física, Universidad de La Habana (Cuba): «Un problema de Física General sobre ondas gravitacionales y fusión de agujeros negros»
- Rolando Cobas Abad, Dpto. de Física, Instituto Superior Minero Metalúrgico Dr. Antonio Núñez Jiménez, Holguín (Cuba): «La enseñanza de la Física a través de invariantes de conocimientos: una opción metodológica para los planes de estudios E en la carrera Ingeniería Geológica»

- Yamelka Herrera Hernández, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echevarría (Cuba): «Importancia de la mecánica de los fluidos en la carreras ingenieriles»
- Arcelio Hernández, Dpto. de Física, Facultad de Ingeniería, Universidad de Cienfuegos (Cuba): «La evolución de los instrumentos de medición de las magnitudes físicas y su influencia en la modalidad y resultados de las prácticas de laboratorio de Física. Caso del péndulo simple»
- Arcelio Hernández, Dpto. de Física, Facultad de Ingeniería, Universidad de Cienfuegos (Cuba): «Evaluación de dos montajes de bajo costo para la determinación de la componente horizontal del campo magnético terrestre»
- Arcelio Hernández, Dpto. de Física, Facultad de Ingeniería, Universidad de Cienfuegos (Cuba): «Registro eléctrico de las oscilaciones mecánicas, ventajas para el estudio de los casos más generales»
- Arcelio Hernández, Dpto. de Física, Facultad de Ingeniería, Universidad de Cienfuegos (Cuba): «Determinación del momento dipolar magnético de un imán permanente por tres métodos diferentes y comparación de sus resultados»
- Arcelio Hernández, Dpto. de Física, Facultad de Ingeniería, Universidad de Cienfuegos (Cuba): «Uso de sensores de efecto Hall para la medición de campos magnéticos débiles generados en el laboratorio de Física y su aplicación en montajes dedicados al estudio del campo magnético»
- Arcelio Hernández, Dpto. de Física, Facultad de Ingeniería, Universidad de Cienfuegos (Cuba): «Las prácticas de laboratorio de Física asistidas por computadoras. Experiencias y proyecciones para una contribución más efectiva a la formación del profesional»
- Jesús Alba, Facultad de Física, Universidad de La Habana (Cuba): «Digitalización de las mediciones de los anillos de Newton»
- Damián Canelles, Facultad de Física, Universidad de La Habana (Cuba): «Análisis de la potencia generada por un aerogenerador en Cuba. Modelo teórico y desarrollo experimental»
- Jenny Ortega, Universidad Distrital de Colombia: «Contenido del PROCOLER en un sitio web»



Sobre los autores

Octavio Calzadilla

BANES, HOLGUÍN, 1949

Doctor en Ciencias Físicas (1994) por la Universidad de La Habana con una tesis sobre crecimiento de cristales semiconductores en condiciones de microgravedad. Profesor titular de la Facultad de Física de esta universidad, con una activa labor científica que se refleja en la publicación de artículos y participación en eventos. Ha publicado varios textos que se utilizan en la Facultad de Física. Es impulsor de la modernización de los métodos de enseñanza y el uso de las tecnologías de la información y las comunicaciones. Desde 1997, junto a otros profesores nacionales y extranjeros, ha organizado los Talleres de Enseñanza de la Física Universitaria.

Julio Vidal

LA HABANA, 1946

Doctor en Ciencias Físicas (1990) por la Universidad de La Habana con la tesis «Obtención de materiales semiconductores». Profesor auxiliar y consultante de la Facultad de Física de esta universidad, con una activa labor científica que se refleja en la publicación de artículos y participación en eventos. Colabora en la informatización de la universidad y la capacitación de directivos de la administración pública en esa temática. Desarrolla desde hace cuatro años un proyecto con los estudiantes de primer año con el objetivo de perfeccionar su preparación de nivel medio superior. Es impulsor de la modernización de los métodos de enseñanza y el uso de las tecnologías de la información y las comunicaciones. Desde 1997, junto a otros profesores nacionales y extranjeros, ha organizado los Talleres de Enseñanza de la Física Universitaria.



Esta edición
de *VIII Taller Iberoamericano de Enseñanza de la Física
Universitaria (Tibero)*, de Octavio Calzadilla y Julio Vidal (coords.),
se terminó en 2022.

Para su composición se emplearon las tipografías
WARNOCK PRO –en sus variantes CAPTION, TEXT y SUBHEAD–,
del diseñador norteamericano Robert Slimbach;
FAGO –en su variante CONDENSED TABULAR FIGURES (CoTf)–,
del alemán Ole Schäfer;
FONTANA ND –en sus variantes Aa, Cc, Ee, Gg y Ll,
en OLDSTYLE FIGURE (OSF) y SMALL CAPITAL (SC)–,
del argentino Rubén Fontana
y WINGDING –en su variante Regular–
de los norteamericanos Kris Holmes y Charles Bigelow.



Del 11 al 15 de marzo de 2019 se celebró el VIII Taller Iberoamericano de Enseñanza de la Física Universitaria en la Facultad de Física de la Universidad de La Habana, convocado por esta última y la Sociedad Cubana de Física, en colaboración con la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), la Universidad de Burgos, ambas de España, y Karlsruhe Institute of Technology, de Alemania. El taller tuvo como tema central la introducción de la Cosmología en los programas de la licenciatura en Física. Participaron unos cincuenta ponentes de instituciones de Cuba, Alemania, Colombia, España, México y Puerto Rico, que compartieron experiencias relacionadas con temas como el proceso de enseñanza-aprendizaje para mejorar las habilidades profesionales en las carreras de Física, el papel de la enseñanza experimental y el procesamiento de los datos en el aprendizaje de esta disciplina, así como su impartición en la formación de profesionales de distintas especialidades, entre otros. Este volumen reúne la mayoría de las ponencias que se presentaron en el evento, organizadas en cuatro secciones representativas de los principales temas discutidos. Los trabajos publicados aportan resultados investigativos, métodos de trabajo, propuestas y herramientas educativas, provechosos para optimizar la docencia de la disciplina Física.

ISBN: 978-959-7265-01-6



9 789597 265016