

EDUCACIÓN en FÍSICA

ISSN: 0797-9045

Revista de la Asociación de Profesores de Física del Uruguay



EDITORIAL

Compañeros Profesores de Física:

Normalmente nuestras consideraciones acerca de la enseñanza de la Física las encuadramos en el marco del aula y referidas a los alumnos como entes individuales a los cuales va dirigida.

Es conveniente sin embargo, mirar nuestros esfuerzos en la labor docente en Física como una acción hacia la sociedad, en especial hacia la sociedad uruguaya en el momento actual.

Nos encontramos inexorablemente inmersos en una sociedad en la cual el desarrollo tecnológico condiciona las pautas de interacción de sus integrantes en varios aspectos.

Por un lado, los productos de esa tecnología constituyen la mayoría de nuestras metas y la finalidad por la cual muchas veces nos movemos. Existe un proceso que requiere una creatividad constante en la producción de productos.

Por otro lado, desde un punto de vista puramente finalista, este proceso de «auge tecnológico» trae como consecuencia una reevaluación positiva de la formación en Ciencias como condicionante para una posterior formación tecnológica, pues los alumnos formados en esa orientación poseen mayores posibilidades de una exitosa inserción en el mundo laboral.

Al presente existe una enorme demanda de personas formadas en, por ejemplo, Ingeniería, Informática u otras disciplinas de carácter Científico/Tecnológico.

Ese mismo fenómeno puede ser observado, no como dirigido hacia el individuo, sino hacia la sociedad toda, observando ahora la situación desde un referencial que considere al país como una totalidad socio/cultural/económica.

El desarrollo de nuestro país, inevitablemente inmerso en un mundo globalizado, en especial tecnológicamente globalizado, requiere en ese contexto un pronto desarrollo tecnológico. La formación científica de sus jóvenes es una condición necesaria para que eso suceda; el Uruguay no podrá desarrollarse sin una sólida formación científica de gran parte de sus jóvenes.

Además de razones de carácter pragmático, que fundamentan la necesidad de una formación científica intensa, existen otras de índole más general y profunda: la enseñanza de la Ciencia brinda al educando algo mucho más valioso que una formación

específica útil en la coyuntura actual. En idioma popular se dice: «El estudio de La Ciencia abre la cabeza de los alumnos».

Objetivamente, existen formas correctas e incorrectas de razonar. La Ciencia en general y la Física en particular, explicitan constantemente en su estudio la corrección o incorrección de los razonamientos. Un alumno con una adecuada formación científica, muy posiblemente identifique por el resto de su vida los «razonamientos incorrectos» y no será un hombre que «crea cualquier cosa». El estudio de la Física puede ayudar a formar personas que aprendan a razonar y a decidir por sí mismas, es decir individuos libres.

Nuestra Asociación de Profesores de Física colabora en el logro de esas metas, ya que tiene como una de sus finalidades propender a mejorar la enseñanza de la Física. Sus herramientas son los Encuentros, Conferencias, Charlas, Cursillos y en especial la edición de ésta, nuestra Revista.

La revista cumple una finalidad directa que es divulgar entre sus socios información de muy diversa índole compatible con sus fines. Interesa también que los docentes escriban artículos para ser publicados por nuestra Revista. Escribir un artículo para una revista de carácter científico, es una experiencia muy valiosa para quien lo hace por primera vez. Los artículos que recibimos son necesariamente arbitrados por científicos de primer nivel que muchas veces objetan algún elemento del trabajo presentado.

Hemos instrumentado una nueva forma de arbitraje que, además de su función tradicional, agrega un asesoramiento al autor novel, de forma tal que muchas veces, asesorado por el árbitro o por algún miembro de nuestro Consejo Editor, el autor rehace el trabajo, que resulta entonces un elemento útil para el lector e inobjetable desde un punto de vista científico. Es nuestro deseo alentar a los profesores de Física con el objetivo de que nuestra revista, además de recibir aportes de autores externos a la Asociación, también contenga abundantes trabajos provenientes de nuestros socios.

• • •

Reseña de Libros I

Prof. Mario Román Guerra Zabala

Título: «La Partícula Divina», [Si el Universo es la respuesta, ¿cuál es la pregunta?]
Tít. original: «The God Particle» [If the Universe is the Answer, What is the Question?]

Autores: León Lederman - Dick Teresi; **Idioma:** Español;

Editorial: «Drakontos Bolsillo»; **Edición:** 2008 [Barcelona]; **Páginas:** 613.

La bibliografía de divulgación sobre la «Física de Partículas Elementales» es extraordinariamente amplia en los tiempos actuales. Sin embargo, como es sabido, no toda ella es confiable o exenta de simplismos o errores conceptuales. Redactar una obra que informe sobre aspectos de la Física de los siglos XX y XXI, no es tarea sencilla. Cabe señalar, como mérito a destacar, que el pequeño libro que recomendamos es un ejemplo de «algo bien escrito».

El Dr. León Lederman es una figura conocida. Recibió el Premio Nobel de Física en 1988 por sus investigaciones en el campo de conocimiento en el cual el libro que comentamos incursiona. Entre 1979 y 1989, fue director del «Fermilab de Chicago» y uno de los que realizaron el diseño del Supercolisionador Superconductor de Texas.

En la obra que estamos recomendando, el autor plantea a lo largo de nueve capítulos en un análisis de los aspectos fundamentales de la Física de Partículas, las propiedades cuánticas salientes de las diferentes familias y al mismo tiempo, realiza referencias a la historia misma del pensamiento científico. El **enfoque es introductorio; el lenguaje es sencillo, preciso y muy ameno**. El escrito recorre temas que van desde la Física fundamental de los «quarks», las grandes leyes de la Mecánica Cuántica en plena acción, hasta los confines del conocimiento contemporáneo en estas temáticas (por ejemplo el tan mencionado «bosón de Higgs», una de las metas del gran colisionador lineal de hadrones en actual funcionamiento). El autor no pierde oportunidad de mencionar «lazos de conexión o discrepancias» con los planteos provenientes de la Física Clásica tradicional, que ofrece una visión de la realidad y de la fenomenología, que las corrientes modernas han debido parcial o totalmente abolir.

Este «estudio comparado», surge en forma natural cuando se examinan aspectos de las partículas elementales a partir de un lenguaje icónico clásico y se prescinde premeditadamente de todo lo formal derivado de un enfoque matemático. Recordemos en este lugar, que Niels Bohr opinaba que el «lenguaje con imágenes clásicas» es el único adecuado con nuestro proceso evolutivo. La utilización de imágenes clásicas, es un aspecto relevante del escrito que comentamos y que nos muestra los recursos didácticos excepcionales del Dr. León Lederman, como transmisor de ideas. Es sabido, que los Programas de enseñanza, no incluyen específicamente estos temas en sus desarrollos, que no obstante tienen un sortilegio especial para los auditorios de jóvenes adolescentes, dado que se describe un mundo pictóricamente sub- realista.

Por los motivos anteriormente expuestos, pensamos que esta obra es un aporte de importancia. Un aporte que permite, a quienes aun no la conozcan, disponer de un «semillero de ideas y propuestas» posibles para el análisis y la discusión.

Esperamos que este comentario breve, sea suficiente motivación para que quienes no conocen la obra, dediquen una parte de su tiempo a una lectura que les ofrecerá caminos de interés para su tarea docente y para la mejor comprensión del complejo panorama actual de las grandes teorías.

PROCEDIMIENTO DE PRESENTACIÓN DE TRABAJOS

Pueden ser enviadas para su publicación contribuciones de diverso tipo: trabajos teóricos, experimentales, de investigación, tesis, comentarios de libros, trabajos de divulgación, sugerencias de sitios web, comentarios acerca de software, y todo artículo que promueva el conocimiento o la enseñanza de la Física o ciencias afines.

Estos trabajos pueden enviarse impresos, manuscritos o en formato electrónico; por e-mail a:

*apfu@adinet.com.uy o
revistaapfu@gmail.com,*

por fax al (598) 2400 1258 o entregados personalmente en el local de la Asociación (18 de Julio 1559 Ap. 401), días hábiles de 14.00 hs a 19.00 hs) en forma impresa o manuscrita y si es en formato electrónico en CD, DVD, pendrive o tarjetas de memoria, debidamente identificados adjuntando una carta donde se solicita la consideración de dicho trabajo para ser publicado en la Revista.

En general no se aceptarán trabajos que ya hayan sido publicados, o estén en consideración de publicación, por otro medio diferente a esta Revista. El Comité Editorial podrá autorizar en forma extraordinaria la publicación de trabajos que se encuentren en la condición anterior atendiendo a razones justificadas.

Cuando la APFU recibe un trabajo para su publicación en la Revista asume que:

- a. dicho trabajo puede ser publicado en la Revista o reimpresso, como considere el Comité Editorial. Para su publicación en un medio diferente a la Revista, la

APFU requerirá de los autores una autorización por escrito.

- b. es responsabilidad de los autores, no de la APFU, requerir el consentimiento de otras partes para la publicación de dicho material, como ser por ejemplo, imágenes o datos previamente publicados.

El contenido de los trabajos publicados en la Revista es de exclusiva responsabilidad de sus autores, no de la APFU.

Los trabajos serán arbitrados en forma anónima y del informe de este arbitraje se decidirá si dicho trabajo amerita ser publicado en la Revista. Durante el arbitraje se puede requerir de los autores explicar, ampliar o reescribir parte de su trabajo. Si se decide publicar el trabajo, se les comunicará a los autores la aceptación y se les pedirá, si aún no lo han hecho, de enviar el trabajo en formato electrónico y con el estilo fijado por la Revista.

Para su publicación los trabajos deben ser presentados en formato electrónico susceptible de ser editado. Se prefiere que lo hagan en formato .doc ya sea con MS Word, Writer de OpenOffice.org u otro editor de texto que genere archivos .doc. No se aceptan en formato .pdf Los trabajos deben ser enviados a la Asociación o la Revista en la forma descripta anteriormente.

Estos trabajos deben ser presentados siguiendo ciertas reglas de estilo. Estas reglas, así como una plantilla que sirve de modelo para la presentación de los trabajos, se encuentran en la página web de la APFU:

<http://apfu.fisica.edu.uy>

LA LEY DE AMPÈRE-MAXWELL Y EL CAMPO MAGNÉTICO DE UNA CARGA EN MOVIMIENTO

Álvaro Suárez

Profesor de Física en el liceo N°1 de La Paz y en el
Instituto de Profesores Artigas; alsua2000@hotmail.com

Artículo

Resumen

En este artículo se encuentra una expresión para el campo magnético generado por una partícula cargada en movimiento a partir de la ley de Ampère-Maxwell, mostrándose por ende la compatibilidad entre dicha ley y la de Biot-Savart.

Palabras clave:

Ampère-Maxwell, Biot-Savart, corriente de desplazamiento.

A) Introducción

Las ecuaciones de Maxwell son el conjunto más pequeño de ecuaciones con las que se puede describir los campos electromagnéticos. Sin embargo, existe un conjunto de leyes que poseen un dominio de aplicación limitado que surgen de las ecuaciones de Maxwell. Tal es el caso de la ley de Biot-Savart, la cual se aplica para determinar el campo magnético generado por una corriente de conducción.

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \oint \frac{\hat{e}_l \wedge \hat{e}_r}{r^2} dl \quad (1)$$

La demostración de dicha ley se realiza a partir de la ley de Ampère en su forma diferencial en conjunto con el potencial vector magnético [1].

Considerando a una partícula cargada en movimiento como un elemento de corriente de conducción se deduce una expresión que permite determinar el campo magnético generado por una partícula cargada moviéndose con una velocidad constante v , siendo $v \ll c$ [2].

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q\vec{v} \wedge \hat{e}_r}{r^2} \quad (2)$$

El hecho de que la ecuación 2 se pueda obtener partiendo de considerar a una partícula cargada en movimiento como un elemento de corriente de conducción resulta paradójico, ya que al encontrarse en movimiento, en cada punto del espacio el campo eléctrico generado por ésta varía con el tiempo. Por lo tanto cada posición del espacio tiene asociado un elemento de corriente de desplazamiento.

B) Corriente de desplazamiento asociada a una partícula cargada moviéndose con velocidad constante

Consideremos una partícula cargada positiva moviéndose con cierta velocidad v constante. Tomemos una curva cerrada C , tal como indica la figura 1. Como la partícula cargada se aleja de la curva mencionada, el flujo de campo eléctrico a través de una superficie delimitada por la misma, disminuye con el tiempo. Por lo tanto existe una corriente de desplazamiento a través de la superficie de área A .

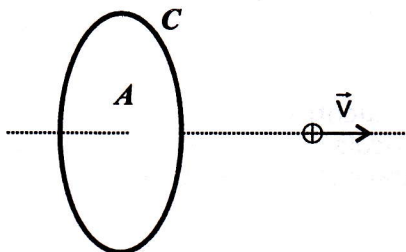


Fig. 1. El flujo de campo eléctrico a través de la superficie de área A disminuye con el tiempo.

El flujo de campo eléctrico a través de un diferencial de superficie $\vec{dA}$ está dado por:

$$d\Phi_E = \vec{E} \cdot \vec{dA} \quad (3)$$

Donde el campo eléctrico generado por una partícula cargada en movimiento está dado por [3]:

$$\vec{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 w^2} \frac{(1 - v^2/c^2)}{[1 - (v^2/c^2)\sin^2\alpha]^{3/2}} \hat{e}_r \quad (4)$$

Sustituyendo esta ecuación en la 3 y realizando el producto escalar entre $\vec{E}$ y $\vec{dA}$ se obtiene:

$$d\Phi_E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 w^2} \frac{(1 - v^2/c^2)}{[1 - (v^2/c^2)\sin^2\alpha]^{3/2}} \cos(\pi - \alpha) dA \quad (5)$$

A partir del diagrama de la figura 2, se ve que $\cos(\pi - \alpha) = -x/w$ y $\sin\alpha = h/w$ siendo $w = \sqrt{x^2 + h^2}$. Por lo tanto:

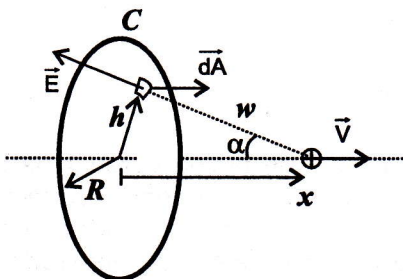


Fig. 2. Representación de las variables del problema para determinar el flujo de campo eléctrico a través de la superficie de área A .

$$d\Phi_E = -\frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{(1 - v^2 / c^2)}{\left[(1 - v^2 / c^2) \frac{h^2}{(x^2 + h^2)} \right]^{3/2}} \frac{x}{(x^2 + h^2)^{3/2}} dA \quad (6)$$

Operando sobre la expresión anterior y simplificándola se obtiene:

$$d\Phi_E = -\frac{q(1 - v^2 / c^2)}{4\pi\epsilon_0} \frac{x}{\left[x^2 + h^2(1 - v^2 / c^2) \right]^{3/2}} dA \quad (7)$$

Para determinar el flujo de campo eléctrico a través de toda la superficie, se integra la expresión anterior en toda la superficie.

$$\Phi_E = -\frac{q(1 - v^2 / c^2)}{4\pi\epsilon_0} \iint_{00}^{R, 2\pi} \frac{x}{\left[x^2 + h^2(1 - v^2 / c^2) \right]^{3/2}} h d\theta dh \quad (8)$$

$$\Phi_E = \frac{q}{2\epsilon_0} \left[\frac{x}{\left[x^2 + (1 - v^2 / c^2) R^2 \right]^{1/2}} - 1 \right] \quad (9)$$

A partir de la derivada respecto al tiempo del flujo de campo eléctrico, se obtiene la corriente de desplazamiento que atraviesa la superficie de área A .

$$i_D = \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \quad (10)$$

Como el flujo de campo eléctrico depende de la posición x de la partícula, que a su vez es función de la velocidad de la misma:

$$\frac{d\Phi_E}{dt} = \frac{d\Phi_E}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{d\Phi_E}{dx} v \quad (11)$$

$$\frac{d\Phi_E}{dt} = v \frac{\frac{d}{dx} \left[\frac{q}{2\epsilon_0} \left[\frac{x}{\left[x^2 + (1 - v^2 / c^2) R^2 \right]^{1/2}} - 1 \right] \right]}{dx} \quad (12)$$

$$\frac{d\Phi_E}{dt} = \frac{vq}{2\epsilon_0} \frac{R^2 (1 - v^2 / c^2)}{\left[x^2 + (1 - v^2 / c^2) R^2 \right]^{3/2}} \quad (13)$$

Por lo que la expresión de la corriente de desplazamiento resulta:

$$i_D = \frac{vq}{2} \frac{R^2 (1 - v^2 / c^2)}{\left[x^2 + (1 - v^2 / c^2) R^2 \right]^{3/2}} \quad (14)$$

C) Determinación del campo magnético generado por una partícula cargada moviéndose con velocidad constante a partir de la ley de Ampère-Maxwell

Para determinar el campo magnético generado por la partícula cargada en un punto P ubicado sobre la curva C , se aplicará la ley de Ampère-Maxwell sobre dicha curva.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 (i_c + i_D) \quad (15)$$

La corriente de conducción (i_c) a través de la superficie delimitada por la curva C es nula; además, a partir de las transformaciones de Lorentz para los campos eléctrico y magnético sabemos que el campo magnético generado por la partícula cargada en movimiento tiene igual módulo en cada punto de la curva y es tangencial a la misma [4,5], por lo que determinando

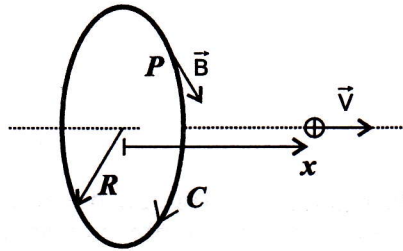


Fig. 3. El campo magnético es tangente a la curva C en cada punto de la misma.

la circulación del campo magnético a lo largo de la curva C en el sentido indicado en la figura 3, se obtiene:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = B 2\pi R = \frac{\mu_0 v q}{2} \frac{R^2 (1 - v^2 / c^2)}{[x^2 + (1 - v^2 / c^2) R^2]^{3/2}} \quad (16)$$

El campo magnético en un punto sobre la curva C vale:

$$B = \frac{\mu_0 v q}{4\pi} \frac{R^2 (1 - v^2 / c^2)}{[x^2 + (1 - v^2 / c^2) R^2]^{3/2}} \quad (17)$$

Factorizando R^2 del denominador de la expresión anterior, simplificando y reordenando:

$$B = \frac{\mu_0 v q}{4\pi} \frac{(1 - v^2 / c^2)}{R^2 [x^2 / R^2 + (1 - v^2 / c^2)]^{3/2}} \quad (18)$$

A partir del diagrama de la figura 4, se ve que $\tan \beta = R / x$. Sustituyendo la expresión para la tangente en la ecuación 18 y utilizando la relación

trigonométrica $\frac{1}{\tan^2 \beta} = \frac{1}{\sin^2 \beta} - 1$, se obtiene:

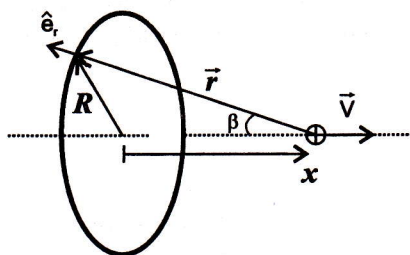


Fig. 4. El sentido del campo magnético coincide con el del vector definido por el producto vectorial $\vec{v} \wedge \hat{e}_r$.

$$B = \frac{\mu_0 v q}{4\pi} \frac{(1 - v^2 / c^2)}{(R^2 / \sin^3 \beta) [1 - (v^2 / c^2) \sin^2 \beta]^{3/2}} \quad (19)$$

Como $\sin \beta = R / r$, siendo $r = \sqrt{x^2 + R^2}$:

$$B = \frac{\mu_0 v q}{4\pi r^2} \frac{(1 - v^2 / c^2) \sin \beta}{[(1 - v^2 / c^2) \sin \beta]^{3/2}} \quad (20)$$

Considerando la dirección y sentido de los vectores $\vec{v}$ y $\vec{r}$, se encuentra la expresión vectorial para el campo magnético generado por una partícula cargada moviéndose con velocidad constante v :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{(1 - v^2 / c^2)}{[(1 - v^2 / c^2) \sin \beta]^{3/2}} \frac{q \vec{v} \wedge \hat{e}_r}{r^2} \quad (21)$$

Esta expresión muestra la compatibilidad entre la ley de Ampère-Maxwell y las transformaciones de Lorentz para los campos eléctricos y magnéticos.

Cuando $v \ll c$, la ecuación 21 se puede aproximar a:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q \vec{v} \wedge \hat{e}_r}{r^2} \quad (22)$$

Siendo la última expresión la misma que se obtiene a partir de la ley de Biot-Savart (ecuación 2).

D) Conclusiones

El haber encontrado a partir de la ley de Ampère-Maxwell una expresión para el campo magnético generado por una partícula cargada en movimiento idéntica a la que se obtiene a partir de la ley de Biot-Savart, muestra la compatibilidad entre dichas leyes

Asimismo este resultado muestra la profunda diferencia que existe entre dichas leyes al momento de interpretar la forma en que es generado el campo magnético de una partícula cargada en movimiento, ya que desde el punto de vista de la ley de Biot-Savart, dicho campo es generado por un

elemento de corriente de conducción, mientras que desde el punto de vista de la ley de Ampère-Maxwell es generado por una corriente de desplazamiento.

E) Referencias

- [1] Cheng, David, Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería, 1^{era} edición, USA, Addison-Wesley, 1997. Páginas 178 a 182.
- [2] Alonso, Marcelo-Finn, Edward, Física, volumen II Campos y Ondas, 2^{da} edición, USA, Fondo Educativo Interamericano, 1970. Páginas 550 y 551.
- [3] Purcell, E. Electricidad y Magnetismo, 2^{da} edición, España, Reverté, 1988. Páginas 176 a 178.
- [4] Landau, L. y Lifshitz E. Curso abreviado de Física teórica. Mecánica y Electrodinámica, 4^{ta} edición, URSS, Mir, 1987. Página 172.
- [5] Wangsness, R. Campos electromagnéticos, 1^{ra} edición, México, Limusa, 2001. Página 611.

• • •



*Un proyecto
editorial
al servicio de
estudiantes
y autores
uruguayos.*

**HISTORIA - MATEMÁTICA
LITERATURA - FILOSOFÍA
CIENCIAS SOCIALES - ECOLOGÍA
ADMINISTRACIÓN - DERECHO
FÍSICA - QUÍMICA**

Descuentos especiales
para docentes

Mercedes 1786 CP 11200 - Telefax: 2408 6985 - Montevideo, Uruguay
edideas@adinet.com.uy / www.editorialideas.com.uy



UNA FACETA DIVERTIDA (Y MOJADA) DE LA FÍSICA: APRENDIENDO EN EL PARQUE ACUÁTICO

Arturo C. Martí*, Cecilia Cabeza, Ricolás Rubido

Instituto de Física, Facultad de Ciencias
Universidad de la República, Uruguay
*martí@fisica.edu.uy | <http://fluidos.fisica.edu.uy>

Artículo

Resumen

Por medio de un conjunto de experiencias ambientadas en un parque acuático se muestra una faceta de la Física divertida y, a la vez, seria y formativa. Las experiencias, que ilustran varios conceptos, principios y leyes fundamentales de la Física, se realizaron usando los diferentes juegos del parque y están relacionadas con los siguientes tópicos: leyes de Newton, conservación de la energía y ecuación de Bernoulli, flotabilidad, propagación de ondas lineales y no lineales, turbulencia, termodinámica y óptica. El uso de adelantos tecnológicos de uso corriente como cámaras digitales y computadoras portátiles resultó particularmente beneficioso para la realización de las experiencias planteadas. Este tipo de actividad se puede replicar con grupos de estudiantes escolares o liceales.

Palabras clave

Parque acuático, parque de atracciones, física recreativa, fluidos, turbulencia, leyes de Newton, ondas.

A) Introducción

Uno de los principales desafíos que enfrentamos como educadores en ciencias es resolver el conflicto que se da entre las concepciones previas, o alternativas, que trae el estudiante y las teorías físicas que muchas veces aparecen como contradictorias con dichas concepciones [1]. El origen de estas concepciones es múltiple: la visión parcial que todos tenemos del mundo en que vivimos y la falta de un método científico son algunas entre otras que van más allá del alcance de este trabajo. Sin embargo, el aspecto que sí nos preocupa es que, mas allá de los orígenes que puedan tener estas concepciones, resulta evidente que resultan muy difíciles de cambiar y muchas veces entran en conflicto con las teorías estudiadas en el aula. Este conflicto frecuentemente provoca una división o separación en el aprendizaje donde los conceptos estudiados en las clases de ciencias no tienen relación ninguna con el mundo real. Como consecuencia, el estudiante, en el mejor de los casos, aprende a resolver problemas puramente académicos planteados por el profesor pero no asimila realmente los conocimientos. Esta disociación entre su forma de pensar y los conocimientos

impartidos por el profesor, contribuye al desinterés, a la falta de motivación y, en última instancia, provoca que los conocimientos científicos sean rápidamente relegados.

Una de las formas de resolver este conflicto es el análisis de problemas cotidianos bajo la óptica de la Física. Para lograr este objetivo, estos problemas deben obligar al estudiante a hacer predicciones, poner a prueba sus concepciones y contrastarlas con resultados experimentales de forma activa. En los últimos años ha surgido una corriente que propone la utilización de experiencias demostrativas en el aula. Estas experiencias se basan generalmente en materiales simples y, en general, de bajo costo con el objetivo de estimular la curiosidad, la creatividad y que el estudiante pueda experimentar en su propio medio [2,3]. Esta línea de trabajo se ha visto enriquecida en los últimos años con la incorporación de nuevas tecnologías como computadoras portátiles, teléfonos celulares o cámaras digitales que se han tornado accesibles para un público muy amplio [4].

Otra propuesta se basa en la visita a parques de atracciones, actividad que en algunos países se realiza en forma sistemática [5-8]. Ya en la década de los 70', J.L. Roeder [5] en su artículo sobre la Física de los parques de atracciones, analizó el funcionamiento de algunas atracciones como la *rueda gigante*, los *autitos chocadores*, o las *calesitas*, ilustrando conceptos como aceleración, fuerza centrípeta, energía cinética y potencial entre otros. Con el correr del tiempo, en algunos países estas actividades fueron perfeccionándose y adquiriendo un carácter más institucional y sistemático. En la Ref. [6] el autor orienta en forma detallada y exhaustiva a docentes que quieran planear excursiones de estudiantes de educación primaria y secundaria a parques de atracciones. En ese mismo texto, se discuten aspectos físicos generales relacionados con la mecánica, por ejemplo, la forma óptima de una montaña rusa, la forma *casera* de medir la aceleración experimentada al hacer uso de las diferentes atracciones o procedimientos prácticos para calcular alturas o distancias usando métodos indirectos. También se incluyen cuestionarios, hojas para completar datos y fichas de evaluación. Asimismo se discuten cuestiones prácticas de implementación de las visitas como ser la seguridad o la responsabilidad de las instituciones involucradas. Más recientemente, se propusieron otras actividades conexas como competencias especialmente pensadas para ser realizadas en parques de atracciones [7] o el uso de sensores de aceleración y giro como los incluidos en celulares o *iPods* de última generación para registrar el movimiento en montañas rusas [8]. Otro antecedente que vale la pena mencionar es el sitio de internet [9], donde se plantean algunas discusiones que van más allá de las puramente mecánicas incorporando aspectos de ondas, termodinámica y fluidos.

La gran mayoría de las propuestas mencionadas están orientadas a parques de atracciones mecánicas y no involucran, salvo excepciones, juegos acuáticos. Sin embargo, desde nuestra óptica de físicos especializados en *Física de fluidos*, nos resultó bastante notoria la carencia de actividades centradas en parques acuáticos como los que se encuentran en la región termal de nuestro país y en muchas otras partes del mundo. Aprovechando la oportunidad que en el año 2010, el *X Encuentro Internacional de Educación en Física* organizado por la Asociación de Profesores de Física el Uru-

guay (APFU) tuvo lugar en la ciudad de Salto, centro de la región termal donde se localizan dos atractivos parques acuáticos, propusimos la realización del *Taller de Física en el Parque Acuático*. La ocasión era especialmente atractiva, no solo para plantear experiencias relacionadas con fluidos, sino también para incorporar nuevas tecnologías como las mencionadas anteriormente.

El *Taller de Física en el Parque Acuático* consistió de tres sesiones de cuatro horas de duración. Las dos primeras tuvieron lugar en cada uno de los Parques Acuáticos situados en las proximidades de la ciudad de Salto, Acuamanía y Termas de Salto Grande. Finalmente, la tercera sesión, destinada a analizar los datos y la evaluación del taller, se desarrolló en un aula convencional. Si bien en esta ocasión no era posible, por limitaciones de tiempo, contar con una sesión de discusión previa a la visita a los parques, se distribuyó material y se implementaron foros de discusión por medio de la plataforma EVA de la Universidad de la República. Participaron del taller 28 profesores, procedentes de distintos puntos del territorio nacional y de la República Argentina, divididos en grupos de 3 o 4 integrantes. Cada grupo contaba al menos con una cámara digital con capacidad para filmar, un trípode y una computadora portátil, además de otros materiales de uso corriente como ser pelotas, cuerdas o pequeñas boyas a ser usados en alguna de las experiencias. En este artículo se exponen algunos de los experimentos desarrollados, se analizan sus resultados y, finalmente, se hacen recomendaciones y presentan las conclusiones.

B) Experiencias

1. Newton en el tobogán

En esta experiencia se aplica la segunda ley de Newton a un objeto poco convencional: un participante que se arroja por un tobogán acuático. El parque Acuamanía cuenta con dos toboganes gigantes como se puede apreciar en la figura 1. Las curvas que siguen ambos toboganes están contenidas en sendos planos verticales pero difieren en la curvatura de manera que en uno de ellos, que se asemeja a la famosa braquistócrona (ver página 17), se alcanzan mayores velocidades. Ambos se caracterizan por su gran altura, unos 18 metros (equivalente a un edificio de 6 pisos), por su interior circula un caudal de agua en forma permanente con el objetivo de reducir el rozamiento entre el participante y la superficie. En la sección inferior de los toboganes un mayor tirante de agua asegura una detención relativamente suave.

El procedimiento seguido fue el siguiente. Una vez elegido un emplazamiento lateral que ofreciera una visión lo más amplia posible de los toboganes, se ubicó una cámara digital montada en un trípode con el sensor lo más paralelo posible al plano de los toboganes, se seleccionó la distancia focal adecuada y se ubicó un objeto de longitud conocida previamente (puede ser una cuerda graduada o incluso un participante) para usar de escala de referencia. Debemos destacar que es especialmente importante mantener la cámara bien fija y alineada, la escala bien visible y dejar la distancia focal inalterada durante cada filmación. Se recomienda también prestar atención al número de cuadros por segundo y seleccionar la máxima resolu-

ción (píxeles) permitida por la cámara digital. Una vez revisados estos detalles, un participante se arroja por el tobogán cuidando de ofrecer una referencia visual que sobresalga de la pared lateral.

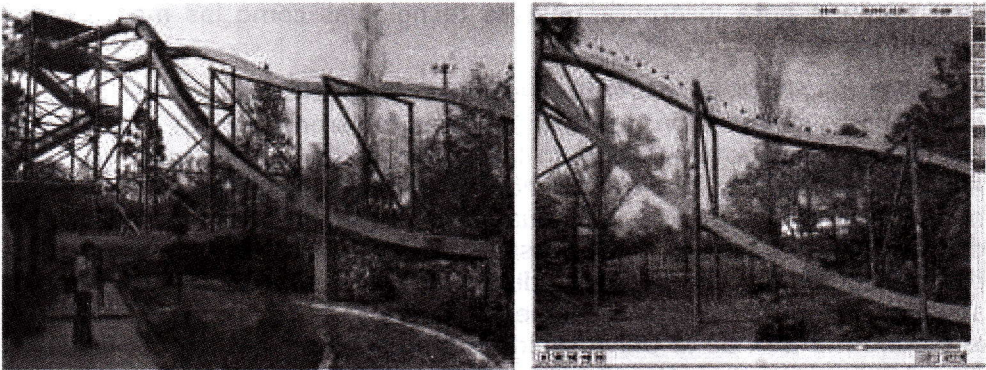


Figura 1: Panorama global de los toboganes del parque Acuamanía (izquierda) y captura de pantalla del programa LoggerPro donde se aprecia la posición del participante para diferentes instantes de tiempo (derecha). En el fondo de la imagen por debajo de los toboganes con una línea verde vertical se ofrece la referencia utilizada, en este caso la altura de una sombrilla.

Posteriormente, haciendo uso de la filmación, se analizan las trayectorias usando algunos de los programas informáticos diseñados con este fin [9]. En el taller se utilizó el conocido programa *LoggerPro*, otra alternativa puede ser el *Tracker*, de uso libre, o el *Matlab* aunque este último tiene una curva de aprendizaje más pronunciada y requiere el pago de costosas licencias. En cualquiera de los casos, conociendo las escalas de longitud correspondientes, se obtienen la trayectoria, la velocidad y aceleración a lo largo de un conjunto de puntos. En la figura 1 (der.) se muestra una instantánea típica obtenida de un participante bajando por el tobogán. Los puntos corresponden a diferentes instantes en que el programa detecta en cada cuadro al participante cayendo por el tobogán. Cada punto está separado por un intervalo de tiempo dado por el número de cuadros por

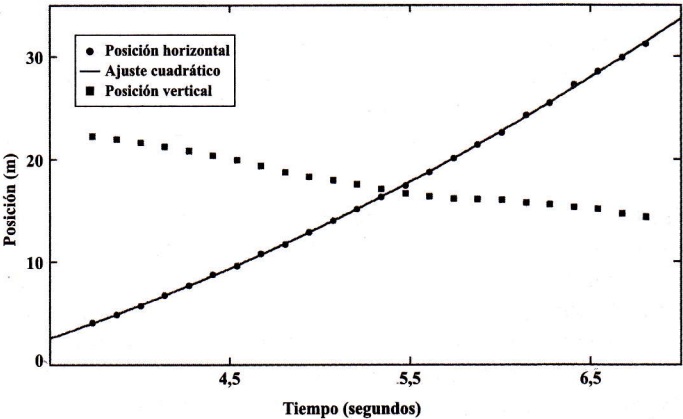


Figura 2: Componentes vertical (cuadrados rojos) y horizontal (círculos azules) de la posición en función del tiempo junto con un ajuste cuadrático de la segunda (aproximación a un cuerpo con aceleración constante).

segundo (o *tiempo de muestreo*) de la cámara utilizada. En la figura 2 se muestra una gráfica de las componentes horizontales y verticales de la posición en función del tiempo, mientras que en la figura 3 se grafican las energías cinética, potencial y su suma (por unidades de masa) en función del tiempo.

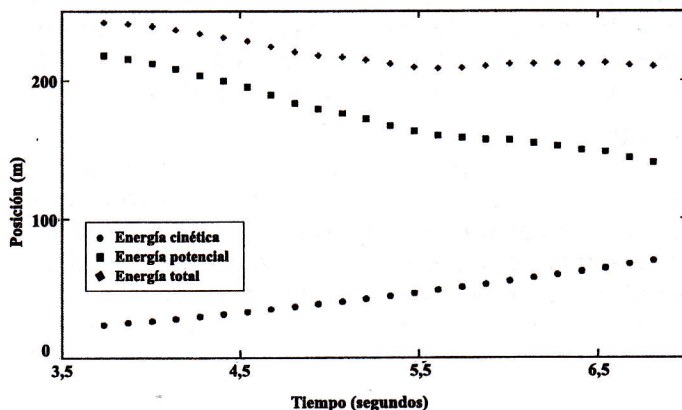


Figura 3: Evolución temporal de las energías cinética (círculos rojos), potencial (cuadrados azules) y total (asteriscos púrpuras) durante el intervalo de tiempo considerado en la figura 2.

En esta experiencia el papel del rozamiento es muy relevante. Como podemos ver en la gráfica de energía total en función del tiempo, si bien la energía disipada es una porción claramente detectable, la razón en que disminuye es lo suficientemente lenta como para que el juego presente un atractivo importante directamente vinculado a las relativamente altas velocidades alcanzadas (del orden de los 50 km/h mientras que la velocidad máxima posible, sin rozamiento, sería cercana a los 68 km/h). Cabe mencionar que en este experimento, el rozamiento tiene dos orígenes bien distintos, por un lado el rozamiento del participante con la superficie del tobogán y por otro el rozamiento del aire. El primero es un rozamiento dado entre dos superficies, participante y tobogán, lubricadas por el agua y se modela por una fuerza dada por el producto de un coeficiente de rozamiento dinámico por la fuerza normal. El segundo, es un rozamiento de tipo viscoso, proporcional a la velocidad y, presumiblemente, dependiente de la velocidad e incluso de la postura del participante. Los datos obtenidos no permiten separar ambos factores, sin embargo, el ajuste cuadrático mostrado en la figura 2 sugiere que el rozamiento superficial es más importante dentro del rango de parámetros del experimento llevado a cabo.

Una vez realizado este análisis, es una excelente oportunidad para discutir el movimiento del objeto en diferentes toboganes comparando el tiempo total de la caída y la velocidad máxima alcanzada. Asimismo, también se puede discutir cual es la forma óptima para la construcción de un tobogán plano en el cual el tiempo de caída sea el mínimo. La solución de este problema fue encontrada por J. Bernoulli en el año 1696 y recibe el nombre de *braquistócrona*. Los métodos matemáticos empleados por Bernoulli exceden los utilizados en la enseñanza media, sin embargo, se puede aprovechar la ocasión para discutir algunas propiedades interesantes de estas curvas [10].

2. Dinámica de una pelota sometida a la fuerza de flotación

Un problema clásico que se encuentra en muchos textos de física general consiste de una pelota de *pingpong* que es soltada dentro del agua desde una determinada distancia bajo la superficie. El objetivo es calcular la altura que alcanza la pelota luego de atravesar la superficie. Habitualmente este problema se resuelve despreciando el rozamiento viscoso y usando la conservación de la energía o la ley de Arquímedes para determinar la fuerza sobre la pelota. Por cualquiera de estos procedimientos se encuentra fácilmente una expresión para la altura máxima alcanzada por la pelota [11].

Para realizar esta experiencia se utiliza una cámara sumergible (o una cámara normal con funda hermética) situada cerca de la superficie del agua de forma de poder determinar la velocidad de una pequeña pelota dentro y fuera del agua. Al igual que en las experiencias anteriores es necesario contar con una escala de longitud en ambos medios (agua y aire) obtenida en este caso situando una regla próxima a la pelota. En la figura 4 se muestra una trayectoria obtenida usando el programa LoggerPro.

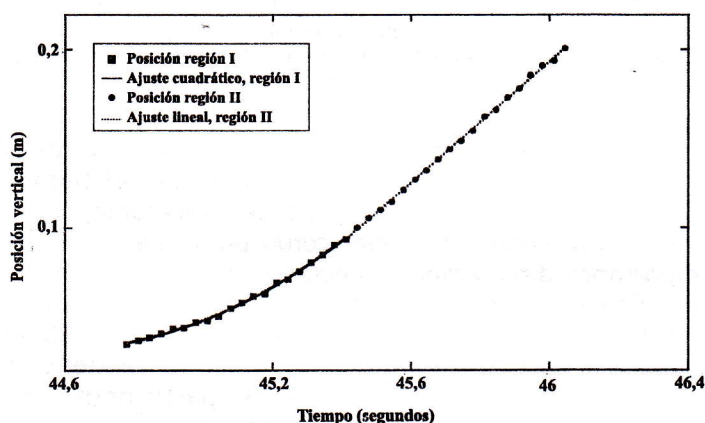


Figura 4. Trayectoria vertical de una pelota de pingpong mientras se encuentra sumergida en agua. Se distingue un primer régimen donde la pelota se está acelerando (región I, cuadrados azules) y un segundo régimen donde se alcanza una velocidad terminal (región II, círculos rojos). Se superponen los ajustes realizados a cada región: cuadrático para la región I (curva continua azul) y lineal para la región II donde se alcanzó la velocidad límite de 0.17 m/s.

Debemos mencionar que contrariamente a una visión excesivamente simplificadora, se observa experimentalmente que el movimiento de la pelota, especialmente en los primeros instantes dista mucho de ser un movimiento unidimensional. En efecto, en esta etapa la pelota presenta notorias oscilaciones horizontales debidas seguramente a movimientos turbulentos del agua muy difíciles de evitar en la piscina. Posteriormente, una vez que la pelota alcanza una cierta velocidad vertical, el movimiento se estabiliza y las fluctuaciones horizontales se vuelven menos notorias.

Cuando nos concentramos en el movimiento en el eje vertical, observamos que el movimiento de la pelota tiene dos etapas bien diferenciadas. Al comienzo el movimiento es acelerado con un valor que se aproxima razonablemente al valor teórico, sin embargo, al cabo de un tiempo relativamente breve, la pelota alcanza una velocidad límite constante característica de

un movimiento viscoso. A partir de esta velocidad límite se puede determinar un coeficiente de rozamiento y un número adimensional de Reynolds para este movimiento que, para los curiosos, mencionamos, es del orden de 800.

Finalmente, determinamos que, como era presumible, la altura alcanzada es considerablemente menor a la predicha usando la hipótesis de fluido ideal (no viscoso) debido a que la viscosidad juega un papel que no puede ser despreciado. En particular vimos que las alturas obtenidas empíricamente son de entre la mitad y la cuarta parte de las obtenidas teóricamente sin considerar rozamiento.

3. Propagación de ondas

El agua es un excelente medio para la propagación de ondas de diversa naturaleza. Algunos tipos de ondas son bien conocidos, como el sonido o las ondas de superficie. En nuestro caso la experiencia se centró en estas últimas, las cuales se pueden observar en cualquier piscina o espejo de agua relativamente calmo y pueden ser de naturaleza gravitatoria o debida a efectos de la tensión superficial (o capilaridad) [12].

Las ondas de superficie en una piscina representan una ocasión propicia para repasar los conceptos de frecuencia, longitud de onda, amplitud y velocidad de propagación y discutir algunas formas de medir dichas magnitudes. En nuestro taller se midieron dichas magnitudes mediante filmaciones y fotografías usando procedimientos similares a los usados en experiencias anteriores.

Otro aspecto, que no fue cuantificado por limitaciones de tiempo, es la relación de dispersión entre el número de onda y la frecuencia, distinguiendo dos casos: las ondas en aguas profundas y en aguas someras (o poco profundas). Cabe mencionar también el estudio cualitativo del fenómeno denominado derivada de Stokes que consiste en el desplazamiento de un pequeño objeto, un trozo de corcho por ejemplo, que flota en la superficie del agua, debido al pasaje de una onda. Este es un fenómeno de origen puramente no lineal, puesto que las aproximaciones lineales a las ecuaciones predicen que dicho desplazamiento es nulo. Con un poco de creatividad, puede idearse un juego o pequeña competencia entre escolares usando este fenómeno.

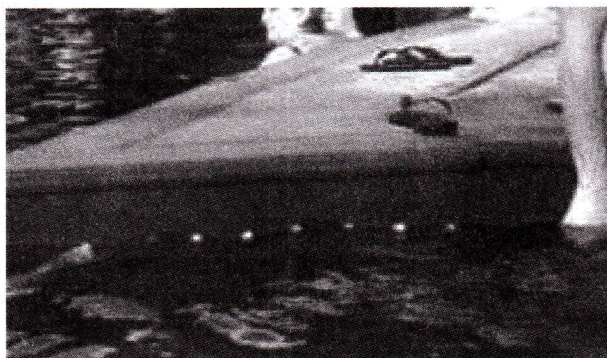


Figura 5. Dispositivo para medir perfiles de ondas formado por un conjunto de boyas equiespaciadas unidas por tanza. En esta oportunidad el dispositivo fue usado cerca del borde de la piscina para mantener las boyas alineadas. Mediante instantáneas se obtienen perfiles con sus correspondientes longitudes de onda, mientras que con filmaciones se miden períodos.

4. A la caza del resalto hidráulico

El resalto hidráulico es un fenómeno muy común que se puede apreciar tanto en grandes canales abiertos (ríos, canales, cascadas) como en la pileta de cualquier hogar [12]. Se origina cuando un fluido descarga a gran velocidad sobre un río o represa y se produce una elevación súbita en la superficie del fluido, donde el fluido luego de la elevación presenta velocidad sensiblemente menor que la que tenía antes del resalto. Los resaltos hidráulicos se producen habitualmente tanto en forma natural como en construcciones, por ejemplo represas. Las mismas se diseñan cuidadosamente para que dichos resaltos se produzcan y de esta forma se eviten condiciones de velocidad del flujo que provocarían fuertes erosiones en las estructuras.

En los juegos presentes en los parques acuáticos se producen resaltos hidráulicos regularmente. Estos resaltos tienen diferentes características, móvil o estacionario, ondular, oscilante, entre otros. Quedan determinados por varios factores, entre ellos el conocido número adimensional de Froude. Un estudio cuantitativo de los resaltos sería posible en caso de disponer algún método cuantitativo para determinar las velocidades o la razón de alturas aguas arriba y aguas abajo del resalto. De esta forma se podría obtener una relación para la energía cinética disipada, el número de Froude y discutir algunos aspectos interesantes de este fenómeno que muchas veces pasa desapercibido pero tiene importancia crucial en diversas aplicaciones. En cualquier caso, un estudio cualitativo ofrece diversas posibilidades de aproximación a este fenómeno. En la figura 6 podemos ver un ejemplo de resalto hidráulico obtenido en el parque.

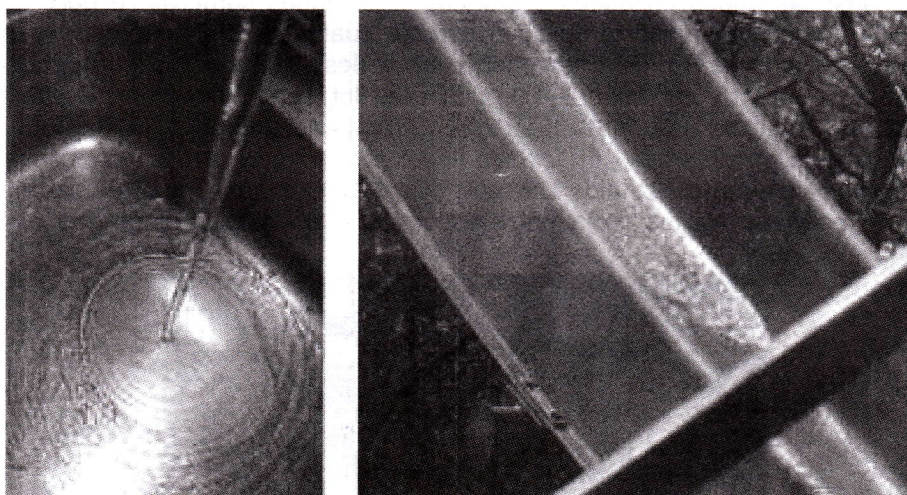


Figura 6 – A la izquierda vemos una fotografía de un resalto hidráulico circular casero tomada de Wikipedia, mientras que a la derecha vemos un resalto inverso formado en uno de los toboganes del parque acuático.

5. Producción de pares de vórtices

Los vórtices o remolinos son estructuras relativamente estables que ocurren en muchos fluidos, caracterizadas por el movimiento de las partículas del fluido siguiendo trayectorias aproximadamente circulares. Un buen ejem-

plo se puede observar en otoño cuando el viento arrastra las hojas caídas siguiendo este tipo de movimiento. En escalas mayores se puede mencionar a los tornados que no son ni más ni menos que un gran vórtice que se mueve con su eje perpendicular a la superficie terrestre. También se observan en el mar, en el humo de un cigarrillo o incluso, en ejemplos menos poéticos, en un laboratorio o inodoro.

La dinámica de la vorticidad fue desarrollada en el siglo XIX, entre otros, por Lord Kelvin y H. Von Helmholtz quienes probaron una serie de resultados de particular belleza matemática [12]. Se puede demostrar que la ecuación que rige las líneas de campo de la vorticidad es similar a la ecuación de la inducción magnética. Por consiguiente, las líneas de vorticidad en el interior de un fluido deben ser o cerradas o terminar en la superficie.

Una forma sencilla de generar vórtices consiste en mover una superficie plana, plato o tabla, en dirección tangencial a la superficie como se muestra en la figura 7. De esta forma se genera una línea de vorticidad en forma de U cuyos extremos alcanzan la superficie. En esta experiencia cualitativa generamos pares de vórtices y fotografiamos la línea de vorticidad que los une por debajo de la superficie usando como trazador pequeñas burbujas de aire que se forman naturalmente.



Figura 7. Participante generando pares de vórtices.

6. Solitones de Falaco o la relación entre los Fluidos y la Cosmología

Una insospechada conexión entre la Cosmología y la Física de Fluidos surgió hace unos años cuando R. M. Kiehn visitaba al brasileño J. Falcao en Río de Janeiro y observó en una piscina que la superficie del agua en rotación genera una suerte de discontinuidad que actúa como lente generando unas sombras bien definidas en el fondo de la piscina. Por analogía con los solitones ópticos (estructuras localizadas de los campos electromagnéticos) y por efecto de un error de imprenta al procesar el artículo que lo reportaba se llamó *Soliton de Falaco* [13].

Para observar los solitones de Falaco, usamos la generación de pares de vórtices, generando de esta forma un par de vórtices que producen dos sombras circulares en el fondo de la piscina como se observa en la figura 8.

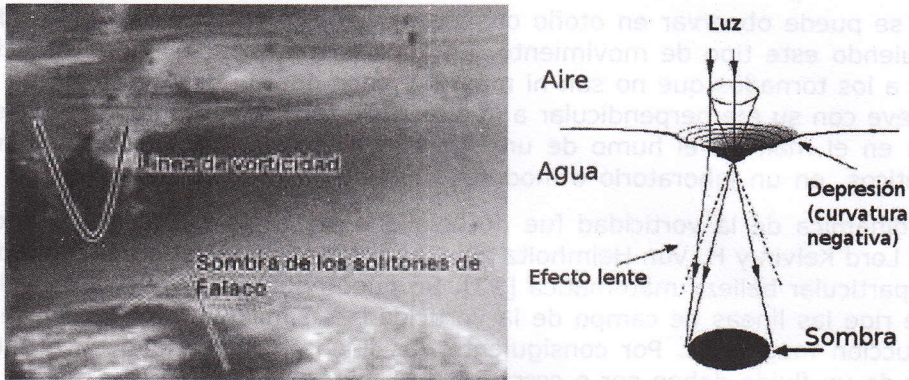


Figura 8. Imagen de los solitones de Falaco tomada con la cámara sumergible (izquierda) y esquema ilustrativo (derecha).

7. Otras experiencias

Brevemente mencionamos a continuación otras experiencias realizadas en nuestro taller. Una de ellas es el estudio de la refracción por la superficie del agua usando la ley de Snell. En este caso se puede determinar el índice de refracción del agua usando la longitud aparente de un cuerpo sumergido. Relacionado con este fenómeno se puede mencionar la *reflexión interna total* que se puede apreciar por un participante ubicado bajo la superficie del agua, pero próximo a ella, que aprecia como la superficie a partir de determinada distancia refleja la luz en lugar de refractarla.

Asimismo vale la pena mencionar otro juego, *El Tanque Loco*, como se observa en la figura 9. Consiste en un tanque de agua que puede girar



Figura 9. Tanque Loco derramando su contenido sobre un participante.

alrededor de un eje horizontal asimétrico. Cuando el tanque esta vacío el centro de gravedad se ubica por debajo del eje y el sistema se encuentra en equilibrio estable. A medida que el tanque es llenado el centro de gravedad se desplaza hacia arriba. Cuando el volumen de agua es suficientemente grande el centro de gravedad se ubica por arriba del eje y el tanque se desestabiliza volcando su contenido sobre los paseantes que observan el espectáculo divertidos.

Este ejemplo práctico que involucra los conceptos de centro de masa, torque y caudal puede servir para discutir la condición de estabilidad y obtener algunas medidas en base a estimaciones del tamaño del tanque y tiempo entre caída del agua. En la figura 9 vemos como un refrescante volumen de agua cae sobre un participante.

Finalmente, en la figura 10, observamos una clásica demostración del principio de Bernoulli donde una pelota se mantiene estable sobre un chorro de agua. Dado que dicho principio establece que la suma de los términos cinéticos y de presión es constante, un incremento en la velocidad implica una disminución de la presión. En la cara de la pelota donde pasa el chorro la velocidad es mayor y por lo tanto la presión es menor produciendo una fuerza neta que estabiliza el sistema.

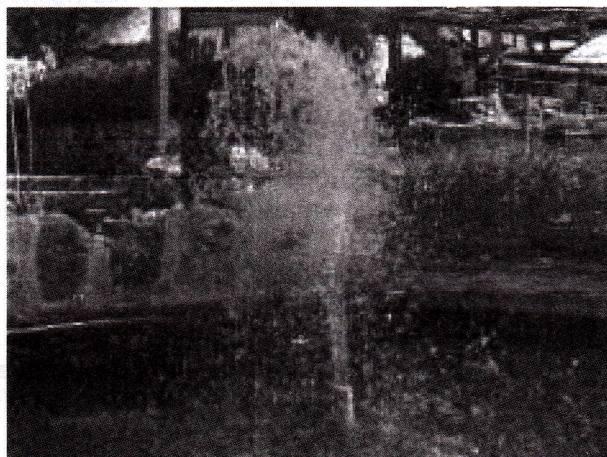


Figura 10. Demostración del principio de Bernoulli donde la pelota oscila sobre el chorro de agua. La mayor velocidad y, por consiguiente, menor presión del lado por donde pasa el chorro es responsable de que la pelota se encuentre estable.

C) Conclusiones y perspectivas

A partir de las experiencias queremos formular algunas recomendaciones generales a la hora de planificar un taller en un parque acuático:

- El trabajo previo al traslado a los parques es fundamental para transmitir claramente los objetivos y planificar estrategias. Es recomendable que esta instancia previa tenga lugar en un aula y no en el parque propiamente dicho de forma que la ansiedad no juegue en contra de una discusión fructífera. También puede resultar conveniente plantear un cuestionario previo con algunos de los aspectos y

conceptos desarrollados a los efectos de asegurarse el aprovechamiento del taller.

- Planificar las experiencias cuidadosamente incluyendo protocolos y hojas de datos. Esta planificación no quita que también puedan plantearse preguntas abiertas o desafíos que impliquen un cierto grado de ingenio mayor que el resto de las experiencias.
- Recabar los permisos necesarios para concurrir con estudiantes y cumplir con las normas de seguridad es especialmente importante. Es de utilidad informarse con los responsables del parque acerca de estos aspectos y en lo posible elegir días y horarios en que los parques no estén muy colmados.
- Resulta muy importante el cuidado a la hora de tomar los datos, especialmente aspectos como la ubicación, alineación y elección de escalas de referencia adecuadas. En caso que no se vigilen estos aspectos es muy probable que no sea posible procesar los datos obtenidos o que los resultados no sean concluyentes.
- El procesamiento de los datos y la discusión de los mismos concentra muchos de los aspectos conceptuales y es allí donde radica la riqueza de las experiencias. Por tanto, resulta necesario dejar en claro a los participantes que el trabajo del taller no termina con la toma de datos, sino que continúa con el análisis y discusión de los mismos.

Estas recomendaciones contribuyen a que el Taller sea una experiencia provechosa académicamente pero también una experiencia divertida y motivadora. También contribuye a mostrar que la Física y la Ciencia en general están presentes en la vida cotidiana y nos dan elementos para comprender mejor muchos fenómenos. Cabe destacar, que en muchos países avanzados se realizan actividades de enseñanza de la Física en parques de atracciones; sin embargo, hasta dónde sabemos nosotros, están siempre orientadas hacia parques de atracciones mecánicas «secas». De esta forma, la actividad realizada tuvo carácter original. Nuestra aspiración es que nuestro taller, y la metodología de enseñanza de la Ciencia que implica, se torne corriente en nuestro medio y el taller pueda, en el futuro, ser replicado con grupos de estudiantes de distintos niveles educativos.

Agradecimientos

Agradecemos a la Asociación de Profesores de Física del Uruguay (APFU) por haber apoyado esta iniciativa, al Prof. José di Laccio por los contactos previos con los parques acuáticos y a todos los participantes del taller por su dedicación y entusiasmo.

Bibliografía

- [1] Randall D. Knight, *Five Easy Lessons: Strategies for Successful Physics Teaching* (Addison Wesley, San Francisco, 2004).
- [2] Robert Ehrlich, *Turning the world inside out and 174 other simple Physics demonstrations* (Princeton University Press, 1997), *Why toasts land jelly-side down: zen and art of Physics demonstrations*, (Princeton University Press, 1997).

- [3] R. D. Edge, *Experimentos con hilos y cinta adhesiva* (AIP, 2002).
- [4] S. Gil y E. Rodríguez, *Física re-Creativa, experimentos de Física usando nuevas tecnologías*, (Pearson Education, Argentina, 2001).
- [5] J.L. Roeder, *Physics and the amusement park*, The Physics Teacher, **13**, 327-332 (1975).
- [6] Nathan A. Unterman, *Amusement Park Physics, A Teacher's Guide*, 2nd edition, (Walch Publishing, Portland, 2001).
- [7] S. Bagge, A.M. Pendrill, *Classical physics experiments in the amusement park*, Phys. Ed. 37, 507-511 (2002). R.F. Moll, *An amusement park physics competition*, Phys. Ed. 45, 362-367 (2010).
- [8] <http://www.worsleyschool.net/science/files/amusement/park.html>. En este sitio se discuten algunos aspectos científicos de una visita a un parque de atracciones que incluye algunas experiencias acuáticas.
- [9] Tracker, programa libre para el análisis de videos y herramientas de modelado: <http://www.cabrillo.edu/~dbrown/tracker/>. LoggerPro, programa de adquisición de datos y análisis de Vernier: <http://www.vernier.com/products/software/lp/>. Matlab, programa muy usado por físicos e ingenieros: <http://www.mathworks.com/>
- [10] H. Goldstein, *Mecánica Clásica* (Reverté, 1998).
- [11] El referido problema fue propuesto años atrás en las Olimpiadas de Física del Uruguay: <http://olimpiadas.fisica.edu.uy>.
- [12] F. White, *Mecánica de Fluidos* (Mcgraw Hill , 2009). P.K. Kundu, I.M. Cohen, D.R. Dowling, *Fluid mechanics* (Academic Press, 2011).
- [13] <http://francisthemulenews.wordpress.com/2008/07/04/solitones-de-falaco-sombras-de-vortices-en-tu-piscina-o-teoria-de-cuerdas-en-tu-piscina/>

• • •

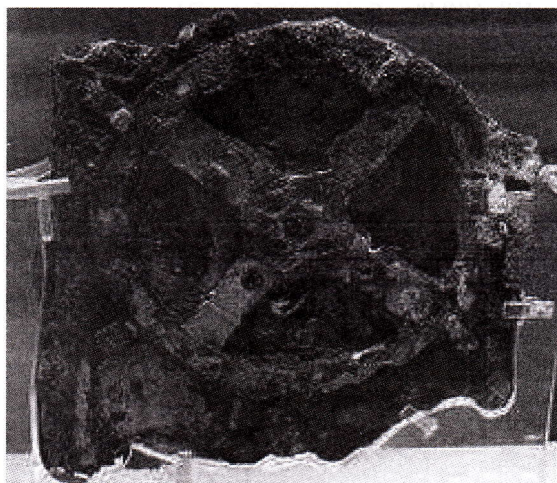
RECOMENDACIONES WEB

Mecanismo de Anticitera-Batería de Bagdad

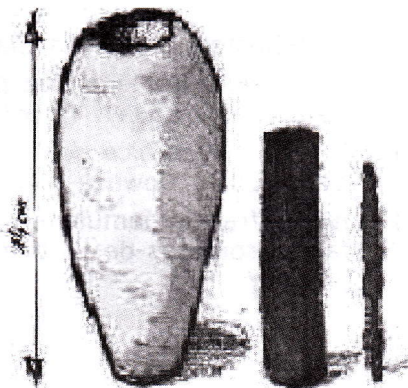
La evolución histórica del conocimiento científico se construye fundamentalmente a partir de documentos bibliográficos, pero en muchos casos los descubrimientos arqueológicos aportan datos importantes.

Tales descubrimientos arqueológicos poseen principalmente valor en si mismos, pero, en algunos casos es muy interesante observar la forma que toman los razonamientos conducentes a deducir o a veces meramente especular acerca de su importancia.

Tal es el caso de los hallazgos conocidos como: «Mecanismo de Anticitera» o «Calculadora de engranajes del siglo I A.C.» figura (a) y la llamada «Batería de Bagdad», siglo II D.C. Figura (b).



(a)



(b)

Información muy completa sobre esos hallazgos y fundamentalmente acerca de las líneas argumentales referidas a su significado e importancia se encuentran en:

http://es.wikipedia.org/wiki/Bater%C3%ADa_de_Bagdad

http://es.wikipedia.org/wiki/Mecanismo_de_Anticitera

...

RESOLUCIÓN A "SITUACIONES PROBLEMÁTICAS EN FISICA (II)"

Carlos Zamalvide

Ex profesor de UDELAR, IPA y UCUDAL; czamalvi@gmail.com

Resumen de la pregunta planteada en el número anterior de nuestra Revista

Al analizar el espectro de frecuencias del sonido obtenido soplando en forma rasante en el borde del cuello de una botella se constata la presencia de una componente de baja frecuencia que no puede ser explicada aplicando el clásico modelo de tubo abierto/cerrado.

El fenómeno debe ser modelado de otra forma, esta forma de modelado se desarrolla en el presente trabajo.

1a) Introducción histórica

Actualmente, debido al gran desarrollo de la Electrónica y la Informática, la medida de frecuencias asociadas a fenómenos eléctricos es una tarea, en general, de fácil realización.

La posibilidad, mediante transducción, de convertir un gran número de magnitudes físicas en magnitudes duales eléctricas, extiende las posibilidades de medida de frecuencias a un enorme conjunto de otras magnitudes.

Un micrófono es formalmente un transductor que transforma una magnitud variable, la sobrepresión acústica asociada a un sonido, en un fenómeno eléctrico, una tensión, que posee un espectro de frecuencias muy semejante al correspondiente a la función que describe el sonido original.

Podemos, sin dificultades especiales, grabar un sonido usando un micrófono y un ordenador (o el propio micrófono incluido en el ordenador); un sistema de adquisición de datos transforma esa señal en otra digitalizada, de tal modo que, mediante el uso de programas de muy sencillo manejo se puede obtener un espectro de frecuencias similar al correspondiente a la señal acústica.

Cabe preguntarse: ¿Mediante qué procedimientos se medían frecuencias, en especial vinculadas a fenómenos acústicos, cuando estas técnicas no estaban aún desarrolladas?

Encontramos el siguiente texto:

«Haciendo uso de los resonadores es como Helmholtz ha hecho el análisis de los sonidos, demostrando que eran compuestos muchos de los que hasta entonces se habían tenido como simples».¹

¹ Diccionario Enciclopédico Hispano Americano.

Lo que indica el texto es, simplemente, que Helmholtz obtuvo y analizó el espectro de frecuencias de ciertos sonidos compuestos, pero el texto se refiere a Hermann Ludwig von Helmholtz (1821-1894).

¿Cuáles fueron los dispositivos que permitieron a Helmholtz analizar, a mediados del siglo diecinueve, el espectro de frecuencias presentes en un sonido compuesto?

Helmholtz realizó medidas de frecuencia asociadas a fenómenos acústicos **usando exclusivamente dispositivos acústicos**, en especial, una herramienta experimental de su invención: El «**Resonador de Helmholtz**».

1b) Resonador de Helmholtz

El dispositivo, que se muestra en la figura N° 1a, consta de un recipiente en general esférico, con un cuello cilíndrico abierto al exterior (parte inferior en dicha figura) y otro orificio, en general mucho más pequeño en una protuberancia ubicada en una posición opuesta al primero.

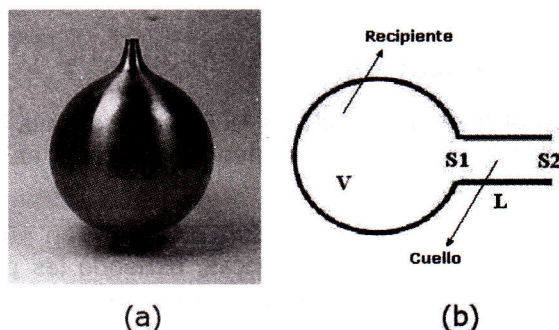


Figura N° 1

Una onda acústica consiste en una perturbación en un medio elástico en equilibrio (sobrepresión acústica). Esa perturbación es un fenómeno espacio temporal y está descrito por medio de funciones que dependen de variables espaciales y del tiempo.

Existe una situación particular en la cual el análisis de un fenómeno acústico se simplifica sustancialmente, se trata del caso donde se analizan fenómenos acústicos en recipientes, ductos o cavidades y la longitud de onda del sonido considerado es mucho mayor que las longitudes que caracterizan geoméricamente al sistema.

Una función sinusoidal varía muy poco en dimensión espacial si se la considera en intervalos de longitudes mucho menores a su longitud de onda.

Entonces, en la hipótesis anterior puede suponerse, sin error apreciable, que dentro de un recipiente en el cual se genera un sonido, en cada instante, la presión es aproximadamente la misma en todo sus puntos, pudiendo variar, eventualmente, con el tiempo.

El fenómeno en las condiciones anteriores podrá describirse, no como debería hacerse en el caso general, en función de variables espaciales y el

tiempo, sino simplemente, por medio de funciones dependientes exclusivamente del tiempo.

Podemos entonces, en la hipótesis anterior, estudiar, modelados en forma muy sencilla, fenómenos acústicos que se producen en cierto tipo de recipientes, en especial en resonadores de Helmholtz. Por supuesto, los resultados obtenidos serán válidos solamente si se encuadran en la hipótesis antes enunciada².

Modelaremos el resonador de Helmholtz, desde un punto de vista geométrico, en la forma simplificada que muestra la figura N° 1b: un recipiente esférico de volumen V unido a través de la sección S_1 a un cuello cilíndrico de longitud L y sección S , abierto al exterior en la sección S_2 .

Ignoraremos la influencia en el fenómeno de la protuberancia y del orificio de pequeño diámetro, presentes en los resonadores originales de Helmholtz, pero inexistentes en los recipientes a los cuales aplicaremos posteriormente los resultados.

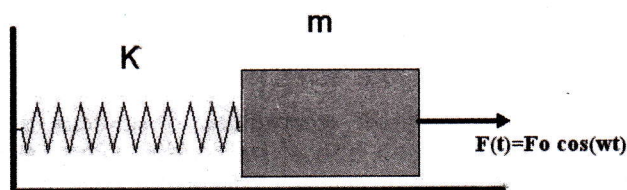


Figura N° 2

En el Anexo N° 1 mostraremos:

- a) que el gas en el recipiente esférico de volumen V , al ser eventualmente comprimido y expandido se comporta como un cuerpo perfectamente elástico y la presión ejercida sobre la superficie interior del cuello extendida sobre la superficie S_1 , tiene las propiedades de una fuerza elástica, suceptible de ser representada por un resorte de constante elástica K , calculable.

Imaginemos ahora una onda sonora sinusoidal, de frecuencia w que incide desde el exterior sobre la sección S_2 del cuello del resonador.

La incidencia de esa onda acústica desde el exterior genera una sobrepresión $p(t)$ distribuida sobre la superficie de dicha sección.

$$p(t) = P_0 \cos(wt).$$

Esta sobrepresión, extendida sobre la superficie S_2 , origina sobre la masa de gas en el cuello una fuerza excitadora:

$$F(t) = S p = S P_0 \cos(wt) = F_0 \cos(wt) \quad \text{con} \quad F_0 = S P_0.$$

Las oscilaciones acústicas del resonador de Helmholtz, oscilaciones de la masa de gas contenida en su cuello, pueden ser entonces modeladas como las oscilaciones unidimensionales de un sistema mecánico masa/resorte, forzado, en primera instancia no disipativo, que se muestra en la figura N° 2, en la cual:

² Kinsler E, Frey A, Coppens A, Sanders J, Fundamentos de Acústica Limusa 1992 Sección 10.1

- m masa del gas contenido en el cuello,
- K constante elástica del «pseudo resorte» y
- F(t) excitación exterior, incidencia de una onda acústica desde el exterior sobre S_2 .

Un sistema masa resorte forzado posee una frecuencia de resonancia, aquella para la cual, si es excitado en esa frecuencia, toma la máxima energía del elemento forzador, en este caso, de la onda acústica incidente.

- b) También mostraremos en el citado anexo, que la frecuencia de resonancia del sistema mecánico que modela al resonador de Helmholtz es, expresada en los parámetros originales del sistema:

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{L'V}} \quad (1)$$

Donde:

- c velocidad del sonido en el gas que llena el resonador.
- S sección del cuello
- V volumen del recipiente esférico

Hemos llamado L' a la longitud «corregida» o «eficaz» del cuello, dicha corrección proviene del hecho que el resonador radia energía en forma de ondas acústicas al exterior por su sección S_2 abierta. Esta disipación puede ignorarse a los efectos del cálculo de la frecuencia de resonancia.

A ese solo efecto, cálculo de las frecuencias de resonancia, puede estudiarse un cilindro equivalente, no radiante, mas largo, de longitud L' .

$$L' = L + \Delta L$$

El valor de ΔL depende, para tubos cilíndricos, de su diámetro D y de la forma de la terminación de su extremo abierto, por ejemplo: en tubo terminado con pestaña $\Delta L = 0.85D$, sin pestaña $\Delta L = 0.6D$.³

El resonador de Helmholtz, una cavidad resonante

Si la onda acústica incidente desde el exterior sobre el cuello del resonador posee la frecuencia de resonancia (1), el sistema toma de ella la máxima energía. Para otras frecuencias la respuesta del oscilador es inapreciable. Podría decirse que el resonador está «sintonizado» a esa frecuencia.

Asimismo, en el instante en el cual la energía mecánica del modelo «oscilador masa/resorte» es en su totalidad potencial elástica, el «resorte» posee máxima deformación o sea que el gas en el volumen V está sometido a máxima compresión o expansión.

En resonancia, ese máximo en la amplitud de la oscilación alcanza, a su vez, su mayor valor, correspondientemente el fenómeno de compresión y expansión del gas en el recipiente alcanza también su mayor amplitud: máxima sobrecompresión acústica.

³ Kinsler E, Frey A, Coppens A, Sanders J, Fundamentos de Acústica Limusa 1992 Secciones 8.12, 9.2

En el anexo Nº 1 veremos que la sobrepresión acústica máxima en el volumen puede ser mayor que la que posee la onda incidente. La energía acústica por unidad de volumen podrá ser, si la onda incidente posee la frecuencia adecuada, mayor dentro del resonador que en el exterior.

El resonador actúa entonces como una cavidad resonante/amplificadora para aquella onda acústica que posee su frecuencia de resonancia.

Experiencias de Helmholtz

Si incide desde el exterior sobre el cuello del resonador una onda sonora compuesta por un sonido fundamental y una serie de armónicos, el resonador responderá solamente para aquella componente, si existe, que posea su frecuencia de resonancia.

Si en esas condiciones se aproxima el oído al orificio pequeño del resonador, se apreciará en el caso de que alguna de las componentes tenga igual frecuencia que aquella del resonador, un sonido mono frecuencial de esa frecuencia y aparecerán de hecho «borrados», para el oyente experimentador el resto de las componentes presentes en la onda incidente.

Si se dispone de series de resonadores adecuadamente diseñados y por tanto de frecuencias de resonancia conocidas, pueden aislarse e identificarse, una a una, las frecuencias de las componentes de un sonido complejo.

Podemos entender entonces la forma en la cual, a mediados del siglo XIX, sin el auxilio de transductores, electrónica ni informática: *«...Helmholtz ha hecho el análisis de los sonidos, demostrando, que eran compuestos muchos de los que hasta entonces se habían tenido como simples»*.

Observaciones:

- a) Las hipótesis realizadas hacen que el modelo solamente puede brindar una aproximación adecuada al fenómeno real cuando se analicen sonidos en sistemas cuyas dimensiones sean mucho más pequeñas que las longitudes de onda de los sonidos involucrados. Se dice que es un modelo para «longitudes de onda grandes» o de «frecuencias bajas»
- b) La reducción del fenómeno a una descripción en una sola variable, y por tanto un fenómeno unidimensional, tiene como consecuencia que puede prever la existencia de solamente una frecuencia de resonancia. El sistema puede tener y efectivamente tiene, otras frecuencias de resonancia mayores⁴.

2) Respuesta a la pregunta formulada en la sección: Situaciones problemáticas en Física II, contenida en el número anterior de ésta Revista

La pregunta formulada se refería a una aparente contradicción entre los resultados experimentales y las previsiones teóricas, en relación al sonido generado al soplar en forma rasante en el cuello de una botella.

Resumíamos la situación de la siguiente forma:

⁴ Kinsler E, Frey A. Coppins A. Sanders J. obra citada, Sección 10.2

«Tradicionalmente, se han vinculado las frecuencias de los sonidos originados por los instrumentos musicales de viento a las ondas estacionarias en tubos abierto/abierto o abierto/cerrado.

Para flautas, fagotes, clarinetes, tubos de órgano y otros, los resultados experimentales se aproximan mucho a las previsiones teóricas correspondientes a ese enfoque.

Nos encontramos sin embargo que cierto «instrumento de viento», la botella, presenta un comportamiento acústico que se aparta bastante de esa teoría.

Se generan en la botella sonidos de longitudes de onda mucho mayores que las que prevé el clásico enfoque analítico/geométrico asociado a las ondas estacionarias en un tubo abierto cerrado.

Claramente, debemos buscar otra explicación para el fenómeno. Debemos modelarlo de otra manera».

2a) Sistema de excitación en los instrumentos de viento.

Excitación por soplo rasante

En los instrumentos de viento, el sonido debe ser mantenido con continuidad y en muchos casos con intensidad constante, por lo cual se debe proveer al instrumento energía en forma continua.

La estructura más común de los instrumentos de viento, como sistemas acústicos, es la de un tubo resonante y un dispositivo de excitación que aporta energía y convierte al sistema en un oscilador forzado.

Llamaremos frecuencia de resonancia de un tubo, cuando se lo excita sinusoidalmente en uno de sus extremos, a aquella frecuencia para la cual la respuesta acústica del tubo es máxima, en idioma eléctrico, para esa frecuencia presenta una «impedancia de entrada» de módulo mínimo.

Nos interesa vincular el sonido de un instrumento de viento **excitado con aporte de energía en forma no necesariamente sinusoidal** con las resonancias del tubo.

La explicación, de la forma en la cual el sistema de excitación aporta energía al tubo y se generan las oscilaciones, **no es**, como a veces se insinúa: *«el sistema de excitación genera oscilaciones en todas las frecuencias, tipo «ruido blanco» y debido a que el tubo presenta una impedancia de entrada muy baja para sus frecuencias de resonancia, se generarán fundamentalmente ondas acústicas en el tubo con esos valores de frecuencia».*

La explicación es otra; luego de un muy corto transitorio, el tubo y el sistema de excitación se comportan como sistemas acoplados, las oscilaciones de la totalidad, sistema de excitación y tubo comportándose como un solo sistema, generan sonidos de frecuencias en la mayoría de los casos coincidentes o muy próximas a las frecuencias de resonancias del tubo.^{5/6}

⁵ Fletcher, N.H. Air flow and sound generation in musical wind instruments. Ann. Rev. Fluid Mech. 1979 11:123-46

⁶ Benade A.H. Relation on air column resonance to sound spectra. J. Acoust. Soc. A. Vol 40.1 1966.

La energía se aporta, casi en su totalidad, a un solo sistema excitador/tubo y por tanto a la generación de sonido.

Tres son las formas clásicas de generar ondas y aportar un flujo de energía al tubo en los instrumentos de viento:

- a) La excitación «de lengüeta» usada por ejemplo en oboes, clarinetes y fagotes.
- b) La excitación «de bisel», usada en tubos de órgano y flautas. Estas formas se muestran esquemáticamente en la figura Nº 3 a) y b) respectivamente⁷.
- c) Una tercera forma que corresponde a los instrumentos llamados «bronces» o «metales», por ejemplo la trompeta, en los cuales el sistema acoplado se compone de tubo/labios del ejecutante.

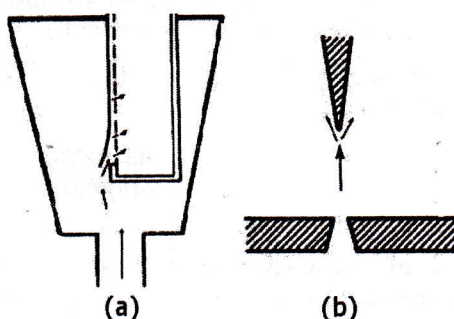


Figura Nº 3

Los sonidos resultantes para las dos primeras formas de excitación están directamente correlacionados, aunque no de la misma forma, con las resonancias del tubo.

Las frecuencias del sonido de una flauta, excitación de bisel, aproximadamente coinciden con las resonancias de un tubo abiertoabierto pues el extremo que contiene la boquilla se comporta, a efectos de las resonancias del tubo como extremo abierto.

Las frecuencias del sonido de un clarinete, sonido de lengüeta, coinciden en cambio, con aquellas de un tubo cerradoabierto pues el extremo que contiene la lengüeta se comporta a efectos de las resonancias como extremo cerrado⁸.

«La nota fundamental tocada en un clarinete está una octava por debajo que la nota que corresponde a una columna del mismo largo tocada en una flauta»⁹.

El sonido generado por el tercer tipo de excitación, en los instrumentos llamados «bronces», posee un espectro tal que, si bien las frecuencias presentes se correlacionan en general con las resonancias del tubo, el ejecutante por medio de sus labios puede cambiar a su voluntad el sistema

⁷ Roederer, Acústica y psicoacústica de la música. Ricordi 1997, Capítulo 4, sección 4.5.

⁸ Roederer, Acústica y psicoacústica de la música. Ricordi 1997, Capítulo 4, sección 4.6

⁹ Roederer, Acústica y psicoacústica de la música. Ricordi 1997, Capítulo 4, sección 4.4

acoplado tubo/labios, de forma que el sonido resultante de este acople variable puede poseer frecuencias que se apartan de las resonancias del tubo.^{10/11}

El resonador de Helmholtz como generador de sonidos

Interesa estudiar las posibilidades del resonador de Helmholtz, no ya como trampa acústica resonante sino como eventual generador de sonidos, como «instrumento musical».

La forma de excitar un sistema para generar sonidos: bisel, lengüeta o labios, es determinante, como hemos descrito, para determinar su espectro acústico.

Podemos generar sonido en una botella o en un resonador por medio de un soplido rasante en su cuello, esta forma de excitación no coincide exactamente con ninguna de aquellas que hemos descrito.

Modelar la generación de sonidos por el resonador o la botella implica modelar el elemento resonador pero también modelar la forma de excitación.

Si bien el soplido rasante no coincide con las formas de excitación descritas, parece razonable suponer que su comportamiento será similar a la excitación de bisel.

Nuestro modelo para el resonador como instrumento musical será el sistema acoplado (excitación tipo bisel)/(resonador de Helmholtz).

Las frecuencias del sonido generado se corresponderán entonces con aquellas de resonancia del sistema resonador con extremo de tubo abierto, en especial, la frecuencia que anteriormente determinamos en la fórmula nº 1.

La validez de las hipótesis realizadas, es decir la consistencia del modelo, se constatará con la coincidencia entre los resultados teóricos previstos y los resultados de las medidas experimentales

El sonido emitido por el resonador de Helmholtz u otro recipiente de forma semejante, usado como «instrumento musical», excitado por soplido rasante, debería contener, de acuerdo al modelo construido, una componente de frecuencia dada por la fórmula (1).

3) Aplicación del modelo. Sonido de la botella

Concluíamos, en la formulación de la pregunta en el número anterior de nuestra Revista:

Se generan en la botella sonidos de longitudes de onda mayores que las que prevé el clásico enfoque analítico/geométrico asociado a las ondas estacionarias en un tubo abierto cerrado.

Claramente, debemos buscar otra explicación para el fenómeno. Debemos «modelarlo de otra manera».

¹⁰ Interpretación de trompeta barroca. Smithers D, Wogram K, Bowsher J. Investigación y Ciencia. Temas 21. Acústica musical. 3er trimestre 2000.

¹¹ Roederer, Acústica y psicoacústica de la música. Ricordi 1997, Capítulo 4, sección 4.5.

De acuerdo a lo expuesto anteriormente se justifica aplicar al fenómeno acústico «sonido de la botella», no ya el modelo de ondas estacionarias sino el modelo «Resonador de Helmholtz».

3a) Sonido de «resonadores» y formas similares.

Analizaremos en primera instancia el sonido generado en recipientes cuya geometría se corresponde con nuestro modelo de oscilador o formas semejantes: matraces de uso en Química Experimental y ciertas botellas de formas que se apartan poco de aquella. Figura Nº 4 a, b y d.

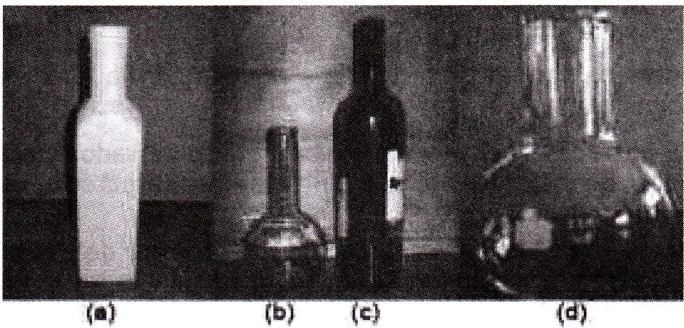


Figura Nº 4

Recipiente	V	ΔV	L	ΔL	D	ΔD	h	Δh	T	ΔT
Matraz (d)	1050	2	10.4	0.2	3.4	0.01	23.6	0.2	25	0.5
Botella (b)	340	2	9.1	0.2	2.1	0.01	18.8	0.2	25	0.5
Botella (a)	280	2	5.0	0.2	1.98	0.01	20.1	0.2	23	0.5

Cuadro Nº 1

El cuadro Nº 1 muestra los datos de tres de los recipientes (a,b,d), que se muestran en la figura Nº 4.

Volumen V, Largo del cuello L, diámetro del cuello D, altura total del recipiente h y la temperatura T a la cual se efectuó la toma de sonido.

Los resultados de las medidas realizadas y sus correspondientes incertidumbres están expresados respectivamente: longitudes en cm, volúmenes en cm³ y temperaturas en °C.

En función de esos datos se pueden calcular o medir:

- f_{AC} frecuencia calculada de acuerdo al modelo «tubo abierto/cerrado».
- f_{He} frecuencia calculada de acuerdo al modelo «Resonador de Helmholtz»
- f_{EXP} valor de frecuencia obtenido experimentalmente.

Estos valores se muestran a continuación.

Los criterios usados para determinar las apreciaciones en las medidas así como en los resultados de los cálculos se exponen en el Anexo Nº 3.

Los resultados experimentales se obtuvieron mediante el procedimiento que se detalla también en el anexo Nº 3.

Matraz Figura N° 4 d)

$$f_{AC} = 326 \pm 4 \text{ Hz} \quad f_{He} = 140 \pm 3 \text{ Hz} \quad f_{EXP} = 139 \pm 2 \text{ Hz}$$

Botella Figura N° 4 b)

$$f_{AC} = 418 \pm 4 \text{ Hz} \quad f_{He} = 168 \pm 5 \text{ Hz} \quad f_{EXP} = 172 \pm 2 \text{ Hz}$$

Botella Figura N° 4 a)

$$f_{AC} = 395 \pm 7 \text{ Hz} \quad f_{He} = 223 \pm 9 \text{ Hz} \quad f_{EXP} = 229 \pm 2 \text{ Hz}$$

Conclusión:

Para recipientes de formas semejantes a aquella con la cual modelamos el resonador, constatamos:

- Se reitera el fracaso del modelo «tubo abierto cerrado» para explicar la componente de baja frecuencia que hemos detectado, en todos los casos, en el sonido emitido.
- Se encuentra en cambio, que el modelo «Resonador de Helmholtz» prevé la existencia de esa componente de baja frecuencia y permite calcularla con un ajuste aceptable en relación al valor experimental.

3b) Sonido de la botella

Corresponde finalmente probar el modelo, calculando de acuerdo a él, la frecuencia del sonido generado con nuestra «botella problema», que originó la situación problemática publicada en el número anterior de nuestra Revista. Figura N° 4 c).

Su geometría se aparta más del modelo que aquella de los ejemplos 3a. Existe una zona extensa de acordamiento no cilíndrica entre lo que hemos llamado cuello y el volumen. El modelo no es estrictamente aplicable.

Aplicaremos sin embargo el modelo original en dos hipótesis extremas: a) El cuello termina en la parte superior de la zona de acordamiento y b) El cuello termina en la parte inferior de esa zona.

Datos de la botella.

Recipiente	V	ΔV	L	ΔL	D	ΔD	H	Δh	T	ΔT
Botella problema, aproximación (a)	750	3	7.0	0.2	1.8	0.01	30.5	0.2	28	0.5
Botella problema, aproximación (b)	705	2	10.0	0.2	1.8	0.01	30.5	0.2	28	0.5

Cuadro N°2

A partir de los valores del cuadro N° 2 pueden calcularse las frecuencias teóricas que prevén los modelos y compararlos con los valores experimentales:

Valores de la componente de baja frecuencia del sonido obtenido al soplar en forma rasante la «botella problema»:

Modelo abierto/cerrado, resultado f_{AC}

Modelo «Helmholtz» en las dos aproximaciones, resultados $f_{He}(a)$, $f_{He}(b)$

Resultado experimental, obtenido directamente de la representación gráfica del espectro de frecuencias, figura Nº 5.

$$f_{AC} = 271 \pm 7 \text{ Hz} \quad (1)$$

$$f_{He}(a) = 110 \pm 4 \text{ Hz} \quad (2a)$$

$$f_{He}(b) = 99 \pm 2 \text{ Hz} \quad (2b)$$

$$f_{EXP} = 118 \pm 2 \text{ Hz} \quad (3)$$

Del análisis de los resultados surge que la previsión del modelo tubo abierto cerrado está muy alejada, como sabíamos al formular la pregunta en el número anterior de nuestra Revista, del resultado experimental.

El modelo Resonador de Helmholtz se acerca al resultado experimental en aquella aproximación a la geometría del resonador que consideramos en la hipótesis a), es decir el cuello termina en el punto en el cual comienza a aumentar su diámetro.

Conclusión:

De la comparación de los resultados podemos concluir que si bien la botella no es un resonador de Helmholtz y por tanto la frecuencia del sonido emitido no tiene por qué coincidir con la calculada por la fórmula 1), modelarla en la forma en la que lo hemos hecho permite determinar la frecuencia del sonido generado con una aproximación aceptable, resultado $f_{He}(a)$, aproximación muy razonable si la comparamos con el resultado muy contradictorio con la realidad física, obtenido al aplicar el modelo «tubo abierto/cerrado».

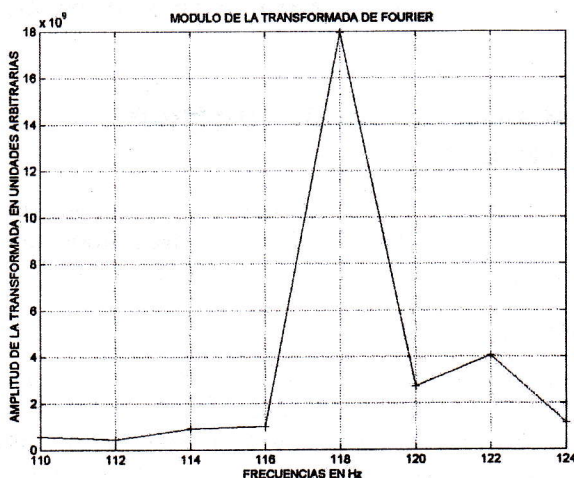


Figura Nº 5

Observaciones:

- La discontinuidad geométrica entre el cuello cilíndrico y el volumen esférico puede aceptarse en el caso del matraz, figura Nº 4d.

Las botellas poseen un mayor o menor grado de acordamiento entre el volumen y el cuello.

Sin mencionarlo, usamos para las botellas de la figura 4a y 4b un criterio único de definición de cuello, aquel que luego resultó ser el más adecuado.

El ajuste del modelo se aparta de la realidad física a medida que se aparta su geometría.

- b) La hipótesis básica del modelo es que el tamaño de la cavidad, en este caso la botella, debe ser mucho menor que la longitud de onda del sonido considerado.

En la situación analizada para la «botella problema» λ/h vale aproximadamente 10 por lo cual podemos considerar que dicha hipótesis se cumple.

El resonador de Helmholtz posee actualmente múltiples aplicaciones en Acústica¹², varias de ellas en instrumentos musicales de viento o percusión. En el Anexo N° 1 describimos algunas.

Anexo N° 1

Aplicaciones actuales del resonador de Helmholtz

Si bien el resonador de Helmholtz como «frecuencímetro» de señales acústicas solamente tiene interés histórico, posee actualmente variadas aplicaciones.

Se describirán algunas aplicaciones sin realizar un análisis exhaustivo, describiendo el papel que juega el resonador en el dispositivo en cuestión y citando la bibliografía especializada.

1) Aplicaciones del resonador de Helmholtz como cavidad resonante

El resonador de Helmholtz como cavidad resonante es un elemento constructivo fundamental en el diseño de diferentes tipos de filtros acústicos pasabanda¹, describiremos dos casos particulares.

1a) cajas acústicas²

Las cajas acústicas de los equipos de sonido son pobres en la emisión de bajos y por tanto los altavoces requieren, entre otros requisitos, para una emisión aceptable, diámetros grandes y desplazamientos también grandes de su membrana lo cual acarrea por ejemplo, efectos no lineales indeseables.

Un diseño de caja en forma de resonador de Helmholtz, con el ducto hacia adentro, mostrado en la figura N° A1.1, generará para frecuencias bajas,

¹² Kinsler E, Frey A, Coppens A, Sanders J. obra citada, Secciones 10.6, 13.5, 14.6

¹ Kinsler E, Frey A, Coppens A, Sanders J, Fundamentos de Acústica Limusa 1992 Sección 10.6

² Kinsler E, Frey A, Coppens A, Sanders J, Fundamentos de Acústica Limusa 1992 Sección 14.6

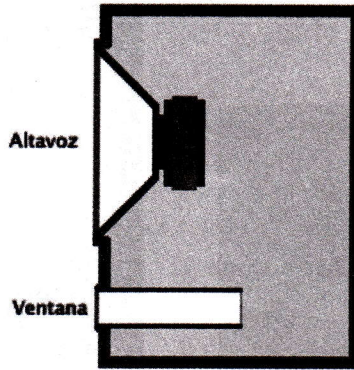


Figura Nº A1.1

próximas a su frecuencia de resonancia un incremento de la energía acústica en el interior de la caja y una radiación mayor de sonidos de baja frecuencia con desplazamientos aceptables de la membrana del altavoz.

1b) Aplicaciones en Arquitectura, acondicionamiento acústico³

Muchas veces en un recinto, es necesario atenuar sonidos de determinadas frecuencias que se conocen a priori.

Las frecuencias bajas son de difícil atenuación pues los materiales absorbentes son en ese caso poco eficaces y requerirían espesores muy grandes.

Es posible utilizar como absorbentes de bajas frecuencias trampas o cavidades resonantes; el resonador de Helmholtz con un diseño adecuado, absorbe la energía de ondas acústicas de determinadas frecuencias, atenuando por tanto su intensidad en el recinto. Con formas convenientes pueden ser integrados como elementos constructivos. Figura Nº A1.2

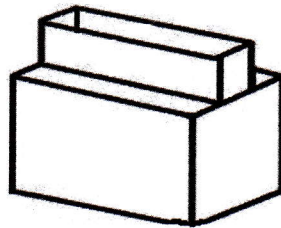


Figura Nº A1.2

2) El oscilador de Helmholtz en instrumentos musicales

Hemos visto que la frecuencia del resonador depende de la «longitud corregida» del cuello, fórmula Nº1 en el trabajo.

$$L' = L + \Delta L$$

Si el largo L del cuello tiende a cero, la longitud corregida L' tiende a ΔL .

³ Kinsler E, Frey A, Coppens A, Sanders J, Fundamentos de Acústica Limusa 1992 Sección 13.6

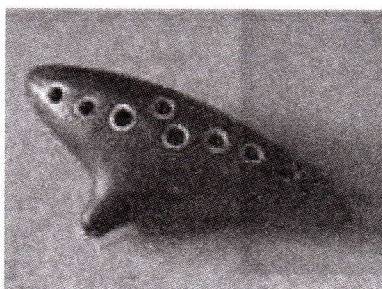


Figura N° A1.3

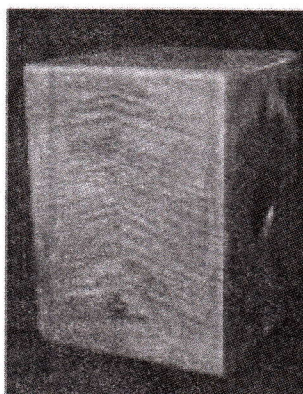


Figura N° A1.4

De acuerdo a esta relación, de origen puramente teórico, un simple orificio en un recipiente debería equivaler formalmente a un «cuello» de longitud ΔL .

Este razonamiento teórico lleva a conclusiones que efectivamente confirma la experiencia. Un recipiente con un orificio se comporta como un resonador de Helmholtz.

Muchos sistemas acústicos con aplicaciones reales se basan en resonadores de Helmholtz con cuello de longitud física cero, es decir solamente consisten en una cavidad con uno o varios orificios.

Retornando al punto 1.a, se diseñan cajas acústicas que en vez de ducto poseen un orificio comúnmente llamado «ventana».

2a) Ocarina, instrumento de viento

La ocarina, un instrumento con más de 12000 años de antigüedad, es un oscilador de Helmholtz con cuellos de longitud nula, ocho orificios en el instrumento que se muestra en la figura N° A1.3

En la ocarina, el ejecutante, tapando o destapando orificios cambia la sección total de los «cuellos» y de esta forma regula la frecuencia del sonido emitido.

Es importante notar que si bien la ocarina es un instrumento de viento, el mecanismo por el cual se cambia la frecuencia del sonido es diferente a otros instrumentos de viento en los cuales ese cambio de frecuencia se produce también tapando o destapando orificios pero al hacerlo se cambia la longitud del tubo; en la ocarina el volumen del recipiente permanece constante.

En la ocarina influyen, en la determinación de la frecuencia, el volumen del cuerpo y el área de los orificios destapados.

3) El resonador de Helmholtz como filtro pasa bajos

Existen otros instrumentos en los cuales el resonador actúa no ya como generador de sonidos sino como filtro pasa bajos de sonidos generados

por otros procedimientos. Analizaremos en especial el cajón peruano y la guitarra.

3a) Cajón peruano

El cajón peruano, en su forma mas simple que se muestra en la figura Nº A1.4 es simplemente un prisma recto de base cuadrada, un cajón, construido de un material elástico, generalmente madera, que posee un orificio circular en una de sus caras. Su geometría se corresponde con aquella de un Resonador de Helmholtz con un cuello de longitud nula.

Se generan sonidos en el cajón peruano golpeando la cara opuesta al orificio.

Las frecuencias y amplitudes del sonido de esa forma generado se corresponden con las oscilaciones de una membrana elástica, la cara golpeada, con condiciones de contorno rectangulares.

Este sonido es filtrado y por tanto cambiado su timbre por: a) las curvas de respuesta correspondientes a las oscilaciones de las otras caras del prisma actuando también como placas elásticas b) los modos normales de la cavidad con forma de paralelepípedo y c) fundamentalmente, por el total cajón/orificio actuando como un resonador de Helmholtz.

Es posible combinar las dimensiones del cajón, dimensiones y propiedades elásticas de la cara posterior y el diámetro del orificio, de forma que el modo fundamental de la oscilación de la cara golpeada tenga una frecuencia cercana a la frecuencia de resonancia del cajón como resonador de Helmholtz.

De la misma forma que el timbre del sonido de una guitarra cambia cuando se pulsa una misma cuerda en dos sitios diferentes, también cambia el timbre del sonido del cajón cuando el ejecutante lo golpea en lugares diferentes de su cara posterior, es decir cambiando la deformación inicial de la membrana. Un golpe cercano al borde fortalece los «armónicos» de frecuencias más altas en el sonido generado por la oscilación de la cara golpeada.

En todos los casos el timbre sonido del cajón está fundamentalmente influido por el valor de la frecuencia de resonancia del resonador.

La guitarra y el resonador de Helmholtz

El sonido de la guitarra se origina en las oscilaciones de sus cuerdas pero no es de la interacción entre las cuerdas y el aire la forma más importante en la cual se crea la onda acústica causante del sonido que percibimos.

Una cuerda simplemente fija en sus extremos, sin caja, origina un sonido de muy baja intensidad y fundamentalmente con un timbre completamente diferente a aquel que posee el sonido de la guitarra.

En la generación del sonido de la guitarra podemos identificar por lo menos tres fenómenos físicos diferentes, dos de ellos usualmente mencionados.

- a) Las oscilaciones de una cuerda con extremos fijo, fenómeno por todos nosotros conocido.
- b) El extremo de la cuerda está unido a una estructura elástica, puente/caja, que se deforma en la interacción con la cuerda vibrante. Si bien

los desplazamientos del extremo de la cuerda son tan pequeños que permiten seguir considerándolos como nodos, involucran fuerzas grandes, por lo-cual el trabajo, es decir la energía de deformación transmitida a la estructura elástica es importante.

La excitación exterior sobre la estructura origina oscilaciones forzadas de las tapas como membrana; forzada en aquellas frecuencias que corresponden a la oscilación de una cuerda con extremos fijos.

No se trata de oscilaciones libres de una membrana inicialmente deformada por un golpe como el caso de un tambor o el cajón peruano sino de deformaciones forzadas sinusoidalmente en frecuencias determinadas.

Se conocen, como resultado de análisis teóricos, las frecuencias de oscilación libre de membranas con condiciones de borde rectangulares o circulares, pero la forma del borde de la tapa de la guitarra vuelve muy complicado su cálculo. Esas frecuencias, de resonancia frente a una excitación exterior, también existen para la tapa de la guitarra y sus líneas nodales pueden visualizarse en forma experimental.

Si alguno de los valores del espectro de frecuencias de la cuerda vibrante es coincidente o cercano a una frecuencia de resonancia de la tapa, esa componente de la vibración original de la cuerda será reforzada.

Las relaciones de amplitudes de las componentes del sonido de la cuerda vibrante, relación que determina su timbre, son alteradas por las diferentes respuestas de las tapas de la caja para diferentes frecuencias, *«El sonido generado por las tapas de la caja en sus oscilaciones posee un timbre diferente a aquel generado por la cuerda aislada»*.

- c) Existe un tercer fenómeno asociado al sonido de una guitarra que pocas veces es mencionado.

La caja de la guitarra con su orificio constituye un oscilador de Helmholtz que como cavidad resonante sintonizada actuará como filtro realzando aquellas componentes próximas a su frecuencia de resonancia.

Pueden encontrarse evidencias de esta influencia en experimentos realizados o citados por Torres Torres J. A.⁴:

c1) Se generaron sonidos «soplando en forma rasante» en la boca de la guitarra, tal cual hicimos con la botella, haciendo incidir aire por medio de un tubo alimentado por un compresor, dirigido sobre el borde de la boca y formando un ángulo pequeño con su plano.

Se generó con la guitarra un sonido mediante un fenómeno formalmente semejante al que llamamos «sonido de la botella».

La frecuencia de este «sonido por soplado» de la guitarra coincidió con aquella que resulta del cálculo mediante la fórmula N° 1 del trabajo.

Se tomaron para el cálculo: longitud de cuello ΔL como corresponde a largo de cuello nulo (orificio), volumen V como el volumen de la caja de la guitarra y como sección S la de su boca.

La coincidencia entre la frecuencia de cavidad resonante y la frecuencia del sonido generado por excitación con soplido rasante para la botella modelada como resonador, descrita en el trabajo, se verifica también

⁴ La boca de la guitarra y su resonancia, Torres Torres J.A. Facultad de Ingeniería UNAM <http://www.cicataqro.ipn.mx/es/tecnologa/V1N3A2.pdf>

experimentalmente para el sonido obtenido al «soplar en forma rasante la boca de la guitarra».

c2) Puede realizarse una experiencia de confirmación parcial. La frecuencia de resonancia del resonador de Helmholtz depende, de acuerdo a la teoría desarrollada, de la sección S del cuello.

La frecuencia del sonido obtenido «soplando» la guitarra depende entonces de la sección de la boca.

Se realizaron experiencias de obtención de sonido en la guitarra «por soplado» tapando parte de la boca de modo de tener orificios de secciones S diferentes; la frecuencia del sonido obtenido sigue la dependencia prevista por la fórmula Nº 1.

Conclusión: Cambia el timbre del sonido de la guitarra al cambiar el diámetro de su boca.

Para una guitarra de dimensiones usuales y dependiendo de las constantes elásticas de la madera con la cual está construida, la resonancia más baja por oscilación de la tapa es del orden de los 150 Hz, mientras que la frecuencia del oscilador de Helmholtz asociado a la caja es aproximadamente 100 Hz.

La caja como resonador/filtro refuerza entonces la respuesta global de la caja para frecuencias por debajo de los 150 Hz.

La caja de la guitarra, considerada como resonador de Helmholtz, es uno de los elementos, junto a las tapas consideradas como membranas vibrantes, que originan el timbre del sonido generado por la guitarra, diferente de aquel de la cuerda aislada.

Anexo Nº 2

Estudio analítico del resonador de Helmholtz

Observación. Se realizará un estudio analítico del resonador de Helmholtz en el cual se omitirán aquellos desarrollos que consideramos meramente complementarios o innecesarios para la comprensión conceptual del tema. En algunos casos se describirán cualitativamente los procedimientos seguidos para la obtención de resultados y se remitirá al lector a la bibliografía adecuada.

A1.1) Valor de la constante elástica asociada al gas contenido en el volumen V del resonador

Analizaremos el carácter elástico de la compresión de un gas en las hipótesis de que se comporta como un gas perfecto y suponiendo además que el proceso que realiza es adiabático.

Nos apoyaremos en las siguientes relaciones provenientes de propiedades termodinámicas:

a) Ecuación de estado de un gas perfecto:

$$P v = R T$$

P es la presión del gas, v su volumen específico, T su temperatura y R una constante propia del gas.

Esa ecuación también puede ser expresada en la forma:

$$P/\rho = R T \quad (1)$$

Donde $\rho = 1/v$ es la densidad del gas.

- b) Si un gas evoluciona de un estado 1 a otro estado 2 en forma adiabática, es decir sin intercambiar energía en forma de calor, se cumplirá:

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma = \text{cte} \quad (2)$$

Donde γ es el índice adiabático del gas.

- c) La velocidad de las ondas acústicas en un gas puede ser calculada por medio de la expresión:

$$c = \sqrt{\gamma R T} \quad (3)$$

Definiremos una ordenada x que fija la posición del centro de masa del

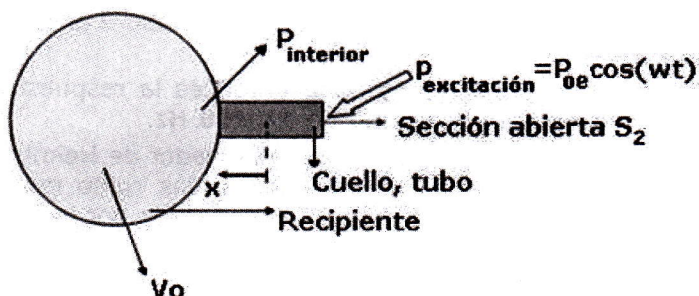


Figura N° A2.1

gas en el cuello y su eventual desplazamiento (figura N° A2.1) y designaremos como V_0 el volumen del gas dentro del recipiente del resonador. Si el gas en el cuello efectúa un desplazamiento pequeño x , penetra en el recipiente desde el cuello un volumen $S \cdot x$ de gas, por lo cual la masa de gas que antes llenaba el volumen V_0 ocupará un nuevo volumen menor V , llamando S a la sección del cuello.

$$V = V_0 - S x$$

Asimismo cambiará la presión del gas en el recipiente, de la presión de equilibrio P_0 a un nuevo valor P mayor.

Supuesto que el proceso del gas en el recipiente es adiabático, se cumplirá, ecuación (2):

$$P_0 (V_0)^\gamma = P (V_0 - Sx)^\gamma$$

O sea:

$$P = P_0 (1 - S x/V_0)^\gamma$$

Para pequeños desplazamientos, desarrollando en serie y tomando el primer término del desarrollo:

$$P - P_0 = (\gamma P_0 S x)/V_0$$

La fuerza neta proveniente de la diferencia de presiones en la sección S es:

$$F = (P_o - P) S$$

Obtenemos entonces:

$$F = -\left(\frac{P_o S^2 \gamma}{V_o}\right) x$$

La fuerza resulta proporcional al desplazamiento y opuesto a él, por lo cual el gas en el recipiente se comporta como un cuerpo perfectamente elástico de constante elástica:

$$K = \frac{P_o S^2 \gamma}{V_o} \quad (4)$$

Transformando la expresión de la velocidad del sonido en el gas (3) y usando la ecuación de estado (1) para eliminar la variable temperatura, llegamos a:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma P_o}{\rho_o}}$$

Despejando P_o y sustituyendo en la expresión (4) de la constante elástica obtenemos finalmente el valor buscado, seudo constante elástica expresada en función de los parámetros originales del problema:

$$K = \frac{\rho_o c^2 S^2}{V_o}$$

A1.2) Estudio analítico del resonador de Helmholtz, modelo no disipativo, frecuencia de resonancia.

Estamos realizando un estudio de sistemas acústicos en las hipótesis que hemos llamado de «longitudes de onda largas» lo cual, como indicamos, nos permite un enfoque unidimensional.

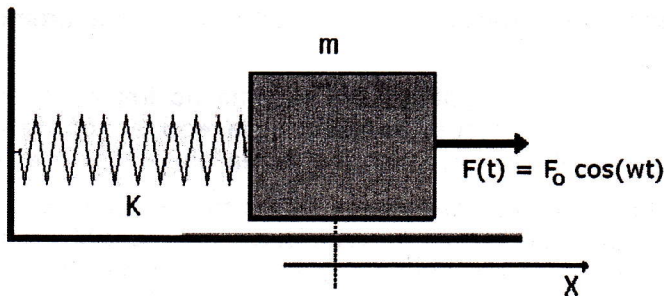


Figura Nº A2.2

Analizaremos el sistema suponiendo que el mismo no es disipativo y por tanto puede ser modelado como un oscilador mecánico según el esquema que muestra la figura Nº A2.2.

La masa m del gas que llena el cuello interacciona con el gas que llena el recipiente que se comporta como una fuerza elástica modelable por un resorte de constante elástica K , que hemos calculado; se ejerce también

sobre esa masa la fuerza sinusoidal resultante de la sobrepresión que ejerce la onda acústica incidente, distribuida sobre la sección S_2 .

la ecuación de Newton aplicada a la masa m de gas contenida en el cuello en esas condiciones de resulta:

$$m \ddot{x} = -Kx + F_o \cos(\omega t)$$

La frecuencia de resonancia será entonces:

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{m}} = \sqrt{\frac{\rho_o c^2 S^2}{V m}}$$

Con:

$$m = V_{\text{CUELLO}} \rho_o = SL \rho_o$$

Resulta:

$$\omega = c \sqrt{\frac{S}{L'V}}$$

Hemos indicado, en su momento, el sentido de la magnitud «longitud equivalente» L' .

A1.3) Resonador de Helmholtz, modelo disipativo

Los elementos disipativos no tenidos en cuenta en nuestro modelo simplificado son esencialmente dos:

- El carácter viscoso que posee el movimiento del gas en el tubo
- La pérdida de energía que experimenta el sistema por radiación acústica a través su extremo abierto, sección S_2 .

Sin embargo, en las situaciones que nos interesan y para los valores de diámetros usuales en botellas los efectos viscosos son despreciables frente a la influencia de la radiación por lo cual solo consideraremos las pérdidas por radiación¹.

Ignorar los elementos disipativos del sistema no impidió calcular su frecuencia de resonancia porque, en esencia, la «corrección de longitud», al solo efecto de calcular las resonancias, toma en cuenta ese fenómeno².

Usualmente, los elementos disipativos en los modelos mecánicos aparecen como fuerzas dependientes de la velocidad, en especial proporcionales a la velocidad, que se corresponden con amortiguadores ideales.

$$F_D = -R \dot{x}$$

Es posible calcular la constante R , de modo que el término F_D , incluido en la ecuación de Newton que describe el modelo mecánico del oscilador acústico, represente una fuerza no conservativa cuya disipación de energía equivalga a las pérdidas del sistema acústico por radiación.

¹ Kinsler, Frey, Coppens y Sanders. Fundamentos de Acústica. Limusa 1992 Sec 10.2

² Kinsler, Frey, Coppens y Sanders. Fundamentos de Acústica. Limusa 1992 Sec 10.2

Omitiendo el cálculo, que puede consultarse por ejemplo en Kinsler³, resulta que el valor de R idóneo para describir en el modelo mecánico la radiación de un tubo circular de diámetro D por su extremo abierto, sin pestaña es:

$$R = \rho_o c \frac{k^2 S^2}{2\pi} \quad k = 2\pi/\lambda$$

La oscilaciones de la masa de gas contenida en el cuello pueden ser modeladas entonces por un sistema mecánico masa/resorte/amortiguador forzado, figura Nº A2.3.

La nueva ecuación diferencial que describe el movimiento será:

$$m \ddot{x} = -Kx - R\dot{x} + F_o \cos(\omega t)$$

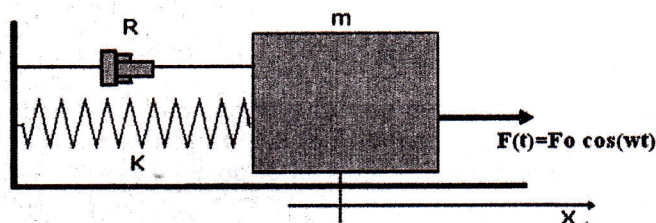


Figura Nº A2.3.

La resolución de la ecuación diferencial anterior, correspondiente al comportamiento de un oscilador mecánico forzado con amortiguamiento, permite obtener las funciones $x(t)$ y $\dot{x}(t)$ que, como sabemos, son sinusoidales de frecuencia ω .

La masa del gas en el tubo oscila sinusoidalmente e impone ese movimiento a la masa de gas inmediatamente vecina contenida en el recipiente.

Esta perturbación genera una onda acústica en el recipiente, sin embargo, en nuestra hipótesis de que la longitud de onda es mucho mayor que las dimensiones del recipiente, puede suponerse que en cada instante, todo el recipiente posee la misma presión que variará con el tiempo en forma también sinusoidal.

Podemos considerar que el volumen de gas en el recipiente se comprime y expande «como un todo», sinusoidalmente, con la misma frecuencia que las oscilaciones de la masa de gas en el tubo y que coincide también con la frecuencia de la onda acústica incidente sobre el borde S_2 abierto del cuello.

La sobrepresión en el interior del recipiente resulta entonces de la forma:

$$p(t) = P_{\text{interior}} \cos(\omega t + \phi)$$

Existe una magnitud propia del gas, *impedancia acústica*, que vincula la sobrepresión acústica de una onda con la velocidad que imprime a la masa de gas⁴.

³ Kinsler, obra citada, Secciones 9.2 y 10.2

⁴ A un dispositivo acústico es posible asignarle un «dual eléctrico»; en esta dualidad la sobrepresión acústica se corresponde con la tensión y la velocidad con la intensidad de corriente; la impedancia eléctrica y la acústica tienen el mismo sentido en ambos modelos, relación entre tensión y corriente o relación entre sobrepresión y velocidad.

Habiendo calculado $\dot{x}$, velocidad del gas en el tubo, coincidente con aquella del gas en el recipiente con el cual está en contacto y conociendo además la impedancia del gas, es posible calcular la sobrepresión p_{interior} que se genera en el gas contenido en el recipiente.

Si comparamos esa sobrepresión interior con aquella que poseía la onda acústica incidente P_{oe} :

$$G = P_{\text{interior}}/P_{\text{oe}}$$

G es la «ganancia» del resonador.

Realizados los cálculos⁵, esa ganancia, en resonancia, resulta para el resonador de Helmholtz:

$$G = 2\pi \sqrt{2 \left(\frac{L'}{S} \right)^3 V}$$

G puede tomar valores mayores que uno por lo cual la intensidad acústica por unidad de volumen que depende del cuadrado de la sobrepresión, será mayor en el interior del resonador que en el borde exterior del cuello donde incide la onda acústica.

El resonador se comporta entonces como una cavidad resonante que absorbe energía en forma selectiva generando en su interior, para su frecuencia de resonancia, una sobrepresión variable que se corresponde con una energía acústica por unidad de volumen del gas en el recipiente que puede ser mayor que la correspondiente a la onda incidente.

Se justifica entonces asignarle al resonador de Helmholtz la propiedad de «cavidad resonante sintonizada».

Anexo N° 3

Descripción del proceso de adquisición/digitalización y análisis de errores

I) Análisis de errores en el procedimiento experimental.

Ia) Descripción del proceso de adquisición de datos y análisis frecuencial.

El sonido a analizar llega al micrófono, (en nuestro caso integrado al ordenador) que actuando como transductor, transforma la variación de presión correspondiente a la onda acústica en una diferencia de potencial variable, $V_A(t)$. La información está ahora contenida en esa función analógica. Figura N° A3.1

La no linealidad del micrófono podría eventualmente hacer aparecer, después de la conversión, máximos inexistentes o desplazar máximos existentes. Pruebas realizadas con sonidos conocidos mostraron que ese fenómeno

⁵ Kinsler... obra citada Sección 10.2.

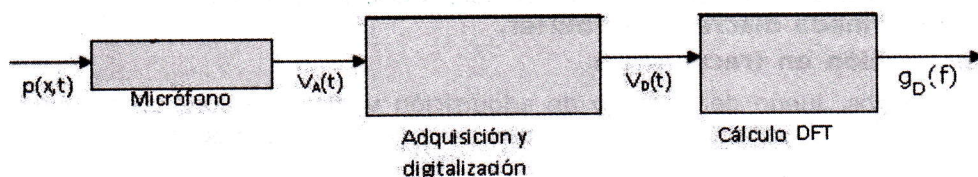


Figura Nº A3.1

no no es apreciable. Convierte entonces el micrófono la función $p(t)$ de origen acústico en otra función $V_A(t)$ de carácter eléctrico con propiedades semejantes.

Esa función $V_A(t)$ llega a la tarjeta digitalizadora del ordenador que determina su valor, es decir la mide, en una serie de instantes igualmente separados, se efectúa un muestreo de la función continua $V_A(t)$; el espaciamiento entre medidas está dado por la frecuencia de muestreo (f_m) que puede ser elegida por el experimentador entre un grupo de valores que ofrece el soft de adquisición.

La información está ahora contenida en un conjunto discreto de números, $V_D(t)$, resultado de la medida de $V_A(t)$ en los instantes elegidos.

1.b) Apreciación en los resultados del muestreo.

El soft de adquisición permite optar, entre una serie de posibilidades:

- El número de bits que reservará el ordenador para almacenar el resultado, en cada instante, de la medida de $V_A(t)$.
- La frecuencia de muestreo
- Toma de sonido estéreo o monoaural.

En forma indirecta, al determinar el número de bits a usar en el almacenamiento del resultado, se acota el número máximo de cifras que puede poseer ese resultado expresado en notación decimal.

Las tomas de sonido fueron realizados en todos los casos con la opción 32 bits, punto flotante.

Un número Y expresado en sistema decimal, cuando fue almacenado usando 32 bits en sistema de punto flotante posee las siguientes propiedades:

- Cubre el rango aproximado:

$$10^{38} > Y > 10^{-38}$$

- Su expresión puede poseer hasta siete y no más, cifras significativas.

Los resultados que obtuvimos en la adquisición y digitalización de sonidos poseían en todos los casos seis cifras, resultado no contradictorio con las consideraciones anteriores.

No sabemos, sin embargo, si todas las cifras son «cifras significativas» y eventualmente el error máximo en la última cifra ni el criterio de redondeo.

Dada la índole de nuestro análisis no es necesario efectuar tomas de sonido estéreo.

1.c) Obtención del espectro de frecuencias. Propiedades de la Transformada discreta de Fourier.

Apreciación en frecuencias:

Obtenemos, luego del proceso de adquisición y digitalización, un conjunto de números, resultado de las medidas de $V_A(t)$ en instantes separados por un período de muestreo $T_m = 1/f_m$.

Para investigar las frecuencias presentes en el sonido en estudio, realizamos un análisis de Fourier a la función que lo describe, en este caso una transformada discreta de Fourier (DFT) a la función digitalizada $V_D(t)$ resultado de la adquisición y muestreo.

Si el archivo V_D posee **N muestras**, obtenidas a una **frecuencia de muestreo f_m** , la DFT es una función **$g_D(f)$** también de carácter digital, que posee en esas condiciones las siguientes propiedades:

- La información que nos brinda la DFT está contenida en un conjunto de **$N/2$** valores que representan las amplitudes de las componentes de frecuencias hasta una frecuencia máxima **$f_m/2$** .
- Esos $N/2$ valores se corresponden con las amplitudes de la transformada para valores de la frecuencia igualmente separados por intervalos $\Delta f = f_m/N$

Conclusiones:

- La DFT nos brinda información sobre las frecuencias presentes hasta el valor máximo $f_m/2$.
- La apreciación en frecuencias de la DFT es $\Delta f = f_m/N$.

Las adquisiciones de sonido se realizaron en forma monoaural, con 32 bits punto flotante, frecuencia de muestreo $f_m = 16.000$ muestras por segundo y los archivos obtenidos poseían en todos los casos más de 4.000 datos; $N > 4.000$.

De acuerdo a la propiedad antes descrita de la transformada, la apreciación en frecuencias, es decir la separación Δf entre dos puntos contiguos en abscisas, será para el caso $N = 4000$:

$$f_m/N = 16.000/4.000 = 4.0 \text{ Hz} = \Delta f$$

Poseemos información del espectro de frecuencias hasta una frecuencia máxima igual a la mitad de la frecuencia de muestreo en nuestro caso $16.000/2 = 8.000$ Hz, Sin embargo, en todos los casos realizaremos nuestros análisis en representaciones gráficas restringidas a entornos de las frecuencias de interés. Figura A3.2

La figura N° A3.2 muestra la representación de la DFT para cierto intervalo de frecuencias, en especial uno en el cual se ubica un pico, un máximo de amplitud, o sea una componente del espectro discreto de frecuencias del sonido analizado.

Se trata de un archivo digitalizado, por lo cual los signos (+) en la figura, corresponden a cada elemento de la función digitalizada DFT y por tanto representan la única información que poseemos; las rectas simplemente unen esos puntos a efectos de visualización.

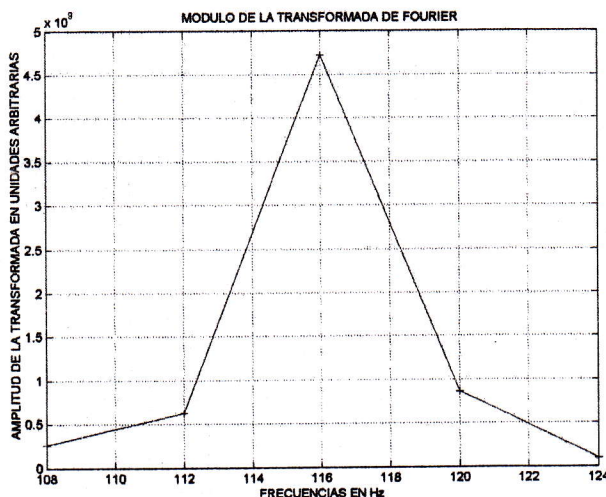


Figura A3.2

Puede observarse en la figura Nº A3.2, debido a que el archivo de sonido poseía exactamente 4.000 muestras, tomadas con una frecuencia de muestreo de 16.000 muestras por segundo, que los puntos correspondientes a la DFT están separados por intervalos de 4 Hz.

El máximo valor de la función se produciría para $f = 116$ Hz, a menos que la incertidumbre en amplitudes sea tal que el máximo fuera en realidad alguno de los valores vecinos.

Errores en las amplitudes calculadas de la transformada discreta de Fourier

El error en amplitud que posee la DFT se origina en por lo menos dos fuentes:

- A partir de los errores que poseen los elementos del archivo digitalizado «datos», existe como en todo algoritmo de cálculo «transmisión» de errores de los datos a los resultados.

En el caso de la DFT los errores originados solamente por «transmisión de errores» dependen del número N de datos y son una función creciente de N .¹

Cuanto más datos posee el archivo, mejora en la apreciación en frecuencias pero empeora el error por transmisión «de error de los datos a error en el resultado».

- Errores generados en la forma que el ordenador efectúa las operaciones mediante las cuales realiza el cálculo de la transformada, por ejemplo algoritmos de cálculo y redondeos.²

Estos errores dependen del ordenador en el cual se está realizando el proceso, de su microprocesador y del soft de cálculo. La influencia de estos errores en nuestro caso es desconocida.

¹ http://en.wikipedia.org/wiki/Fast_Fourier_transform

² <http://www.fftw.org/accuracy/index.html>

Conclusión:

No disponemos información acerca de la apreciación en el resultado de los procesos de adquisición/digitalización y cálculo de la DFT y por tanto no podemos afirmar a priori que la identificación visual de los máximos en la representación gráfica de la DFT, función $g_D(f)$, identificación que depende esencialmente de la apreciación en amplitudes, sea en todos los casos correcta.

Experimento complementario:

Los cálculos se realizaron con presencia de errores cuya influencia en el resultado no puede ser determinada con seguridad.

Podemos, sin embargo, considerar a la totalidad del proceso como un procedimiento de medida de tipo «caja negra» a la cual ingresa una función analógica $p(t)$, sobreposición acústica que describe el sonido analizado, y de la cual sale un resultado obtenido por inspección gráfica visual: la frecuencia a la cual se produce un máximo de amplitud de la DFT con su apreciación estimada (apreciación teórica de la DFT): $f_m \pm \Delta f_m$

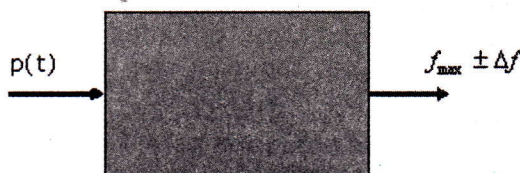


Figura Nº A3.3

Podemos asignar razonablemente al conjunto de errores desconocidos el carácter de accidentales. Los errores sistemáticos son muy raros en los sistemas de adquisición, digitalización y cálculo de DFT.

Si realizamos muchas medidas del mismo fenómeno en las mismas condiciones y las apreciaciones estimadas son mucho mayores que las desviaciones en los resultados provenientes de los existentes «errores accidentales» de cualquier índole no considerados, estos errores quedarían enmascarados y obtendríamos resultados compatibles.

Si en cambio, nuestra hipótesis pecó de optimista y la apreciación estimada no contempla, de hecho esos errores, obtendríamos una dispersión de resultados mayores a la apreciación estimada o sea pares de intervalos resultado/apreciación incompatibles.

Se realizó una serie de 30 tomas de sonido obtenidos en las mismas condiciones y se calculó para cada una de ellas la DFT, se ubicó visualmente el máximo y se le asignó una apreciación de acuerdo al criterio antes descrito.

Se muestreó en todos los casos a 16.000 m/s y 32 bits monoaural, tomando 15 muestras con archivos de 4.000 datos y otras 15 con archivos de 8.000 datos. Las apreciaciones teóricas que prevé la DFT en frecuencia, son entonces 4 Hz y 2 Hz respectivamente.

Los máximos se ubicaron en cada caso en gráficos semejantes a los mostrados en las figuras Nºs A3.2 y A3.4 respectivamente, que permitían a priori su clara ubicación visual.

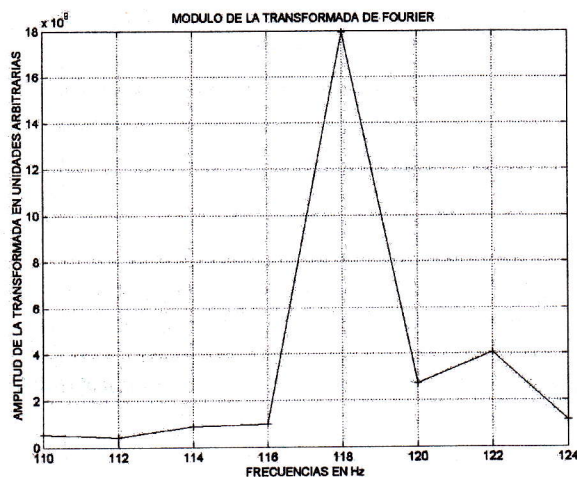


Figura Nº A3.4

Se obtuvieron los resultados que muestra la tabla Nº A3.1, donde:

- N, número de elementos del archivo de sonido digitalizado.
- $f_{\max}$, frecuencia a la cual se ubica el máximo.
- n, número de apariciones de ese resultado.
- E, frecuencia a la cual se produce el máximo expresada con su correspondiente incertidumbre.

N	$f_{\max}$	n	E
4.000	116	8	116 ± 4 Hz
4.000	120	7	120 ± 4 Hz
8.000	116	10	116 ± 2 Hz
8.000	118	5	118 ± 2 Hz

Tabla Nº A3.1

Como se visualiza en el Cuadro Nº A3.1 no existe en el conjunto de 30 medidas realizadas ningún par de resultados incompatibles.

Los errores seguramente existentes y no considerados, han quedado en los dos casos enmascarados dentro de las apreciaciones estimadas y por tanto, aunque posiblemente pesimistas, consideraremos aceptables para la finalidad de nuestra experimentación.

Entonces, las dos formas de determinar el par medida/apreciación, correspondientes a dos largos diferentes de archivo, 4.000 y 8.000 muestras, a una frecuencia de muestreo de 16.000m/s, con nuestro sistema de adquisición, nuestro ordenador y nuestro soft, aparecen en la experiencia como compatibles; podemos entonces adoptar cualquiera de ellas.

Observación: Es conveniente que las adquisiciones de archivos digitalizados de sonido, para realizar comparaciones, se tomen en un intervalo corto de tiempo para poder afirmar que la temperatura se ha mantenido constante, de otra forma hay que esperar que las condiciones se repitan o efectuar «corrección por temperatura».

112	114	116	118	120	122	124

Cuadro N° A3.1

Una diferencia de 1°C en la temperatura equivaldría, en los casos por nosotros considerados un cambio de frecuencia del orden de 0.2 Hz.

II) Análisis de transmisión de errores en los cálculos asociados a la aplicación del modelo.

Para calcular la frecuencia que prevé el modelo usamos la expresión (1) del cuerpo del trabajo que transformamos en:

$$f_R = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{L'V}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi D^2}{4L'V}} = \frac{c(20) \sqrt{\frac{T+20}{293}}}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi D^2}{4L'V}}$$

Si expresamos las constantes conocidas con el número de cifras adecuado, puede tomarse:

$$\frac{\Delta f_R}{f_R} = \frac{\Delta D}{D} + \frac{1}{2} \frac{\Delta L'}{L'} + \frac{1}{2} \frac{\Delta V}{V} + \frac{1}{2} \frac{\Delta T}{T}$$

Para el cálculo de la frecuencia del modelo tubo abierto/cerrado:

$$f_R = c/(4L')$$

Por tanto

$$\frac{\Delta f_R}{f_R} = \frac{\Delta L'}{L'} + \frac{1}{2} \frac{\Delta T}{T}$$

Con los instrumentos de medida usados, corresponden las siguientes incertidumbres para los resultados de las medidas:

$$\Delta D = 0.1 \text{ mm}$$

$$\Delta T = 0.5 \text{ °C}$$

$$\Delta L = 0.2 \text{ mm}$$

$$\Delta V = 2 \text{ cm}^3$$

Las consideraciones expuestas en este anexo fueron aplicadas en el cuerpo del trabajo.

• • •

Reseña de Libros II

Prof. Mario Román Guerra Zabala

Título: «**La totalidad y el orden implicado**»
Tít. original: «**Wholeness and the Implicate Order**»

Autor: David Bohm; **Idioma:** español;
Editorial: «Kairós»; **Edición:** 2008 [Barcelona]; **Páginas:** 308.

El libro que comentamos y recomendamos, es un libro de Mecánica Cuántica, aunque **no** se trata de un texto. Se trata de un escrito cuya finalidad es analizar e indagar en los fundamentos y complejidades de la teoría.

La Mecánica Cuántica admite distintas formas de elaborar la teoría, aunque lo demostrable es la consistencia entre ellas. Sin embargo, existe en los desarrollos interpretaciones diferentes de aspectos que todos los planteos introducen. A modo de ejemplo: el concepto de «realidad física» se interpreta en formas distintas en la forma ortodoxa e inicial, que introdujo la Escuela de Copenhague. Podemos citar teorías alternativas: la Mecánica Cuántica fundamentada por John von Neumann, John Wheeler y Eugene Wigner (1935), o más cerca en el tiempo, Dieter Zeh (1970) o Murray Gell-Mann/R.Griffith (1984).

En esta línea de examen de los fundamentos e interpretaciones que derivan de la teoría, se encuentra la notable y diferente estructura teórica confeccionada por David Bohm, un físico norteamericano (nacionalizado inglés durante los años '50 del siglo anterior) que dedicó en forma ininterrumpida sus mejores talentos a la Mecánica Cuántica desde 1951 hasta su muerte, ocurrida en 1992.

A lo largo de su vida (más de 40 años de investigación) el Dr. Bohm, cultivó una estrecha amistad con el filósofo Krishnamurti, un típico representante del «pensamiento unitario de la realidad». No es llamativo este aspecto, si mencionamos la influencia decisiva que tuvo Carl Jung sobre el Dr. Wolfgang Pauli, o el artista Jean Metzinger en el pensamiento de Bohr.

El libro que proponemos como lectura, es una obra fundamental en el pensamiento de Bohm y estimamos que se trata, sin duda, de una propuesta profunda y asombrosa sobre la forma en que la Mecánica Cuántica interpreta el polifacético concepto de «realidad».

La versión original del libro en lengua inglesa, es de «Editorial Dover». Existe actualmente la excelente traducción realizada en España (Barcelona) por Editorial «Kairós».

La obra refiere a diversos puntos críticos de la teoría, que han ocupado por decenios a los físicos y epistemólogos. Uno de ellos, el significado que debemos atribuir a la palabra «realidad». Bohm es creador del concepto de «universo holográfico», que debemos interpretar, según la teoría, como una «forma multidimensional de la realidad». Nuestra percepción de la misma, originada en el proceso evolutivo del sistema nervioso central, al que se atribuye también una estructura holográfica, nos permite acceder a «proyecciones de un hiper-espacio de varias dimensiones» que se «dibuja» (proyecta) sobre tres dimensiones. La percepción humana, se circunscribe

a esta proyección, sin que dispongamos sensorialmente de la posibilidad de acceder al «todo» en una dimensión de mayor complejidad.

El desarrollo de la obra, escrita con gran claridad y precisión conceptual, introduce al lector en un mundo de ideas que trasciende al simple enfoque material o a una metafísica sobre la realidad elaborada en base de conceptos tradicionales.

Cabe preguntarse si las afirmaciones de Bohm tienen alguna clase de respaldo objetivo. Por lo pronto, sus ideas sobre la realidad y la percepción de la misma, avanzaron desde estadios netamente físicos («entrelazamiento cuántico», «variables ocultas no locales», «campo cuántico guía»,...). Independientemente, Karl Pribram (neurofisiólogo y psiquiatra nacido en Viena) de la Universidad de Georgetown, demuestra consistentemente que el cerebro opera a partir de una «estructura matemáticamente holográfica». Existen técnicas psiquiátricas basadas en esta concepción holográfica que se utilizan en la actualidad.

El camino seguido por Pribram, para elaborar su teoría, fue sin conocimiento previo o simultáneo de los trabajos de David Bohm. La coincidencia de conclusiones, acerca de la forma en que se «percibe la realidad» fue la razón por la que posteriormente unieron los dos científicos sus esfuerzos.

El libro analiza complementariamente un punto esencial del pensamiento de Bohm: el llamado «orden implicado de la realidad» complementario del llamado «orden explicado o desplegado». Este último, es el nivel donde se hallan las leyes que conocemos, las que forman los cuerpos de teorías que utilizamos corrientemente (Mecánica, Teoría Electromagnética, Termodinámica,...). Estas teorías, se manifiestan como cuerpos independientes en el nivel de «orden explicado» (aunque existan unificaciones parciales). Bohm sostiene que la unificación real, donde se esfuman las «complementariedades cuánticas», las leyes específicas, se logra si accedemos al nivel de «orden implicado» donde los conceptos auxiliares de «espacio» y «tiempo» no son fundamentales (simplemente no tienen validez). Cualquier «trozo de universo», encierra toda la información; no hay separación real entre las partes de la realidad (este es el «mensaje de fondo» del llamado «entrelazamiento cuántico» y las conclusiones de John Bell y el experimento crucial de Alain Aspect). Estos descubrimientos, son «señales» de una «realidad profunda» que se manifiesta si además de modificar nuestras teorías, cambiamos nuestra forma tradicional y limitada de pensar. Una forma que se ajusta a las formas históricas que la Física ha elaborado, y que revela severas limitaciones y dificultades.

Recomendamos este libro, con especial entusiasmo, porque estimamos que servirá, sin duda a ampliar el panorama de los lectores.

• • •

SITUACIONES PROBLEMÁTICAS EN FÍSICA (III)

Carlos Zamalvide

Ex profesor de UDELAR, IPA y UCUDAL; czamalvide@gmail.com

Pregunta

Introducción

Seguramente, todos nosotros, en múltiples ocasiones, hemos explicado a nuestros alumnos el concepto de presión en un punto de un fluido.

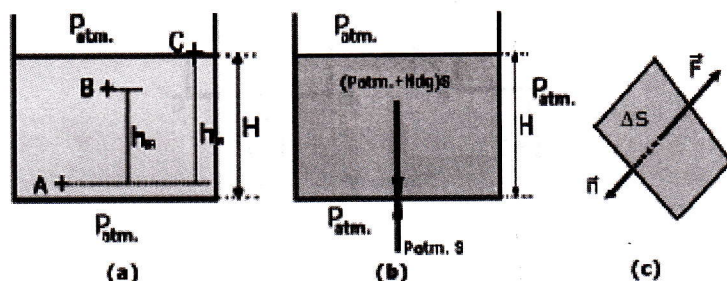


Figura N° 1

Hemos desarrollado también el llamado «Principio fundamental de la Hidrostática», que permite calcular la diferencia de presiones entre dos puntos en un fluido en equilibrio. Figura N° 1 (a)

$$P_A - P_B = h_{BA} d g$$

Donde P_A y P_B son las presiones en los puntos, h_{BA} la distancia vertical entre ellos, «diferencia de profundidades» y d la densidad del líquido.

Si el recipiente está abierto a la atmósfera, podemos afirmar que:

$$P_A - P_C = h_{CA} d g$$

$$P_A = P_{atm.} + h_{CA} d g$$

Un fluido en equilibrio ejerce sobre las paredes del recipiente que lo contiene fuerzas originadas por la presión hidrostática normales a dichas paredes.

Si llamamos $\vec{n}$ al versor normal a la superficie orientado hacia el fluido, $\vec{F}$ a la fuerza originada por la presión hidrostática del fluido distribuida sobre un elemento de superficie ΔS , y p la presión en un punto de ΔS , figura N° 1 (c):

$$\vec{F} = -p \Delta S \vec{n}$$

En especial para puntos del fondo del recipiente, supuesto horizontal, Figura N° 1 (b):

$$P_{fondo} = P_{atm.} + H d g$$

H es el nivel del líquido sobre el fondo del recipiente.

La presión atmosférica se ejerce sobre la superficie libre del fluido, pero también sobre toda la superficie exterior del recipiente, en especial sobre

su fondo, figura N° 1 (b), por lo cual, la fuerza neta originada por las presiones, del fluido por encima y la atmosférica por debajo, sobre fondo del recipiente de área S y supuesto horizontal, será¹:

$$F_{\text{NETA}} = (P_{\text{atm.}} + H d g) S - P_{\text{atm.}} S = H d g S$$

Ejercicio de aplicación

Analizamos un recipiente con forma de paralelepípedo recto de altura H y base cuadrada de lado L , lleno hasta su borde superior de agua. Figura N° 2 (a).

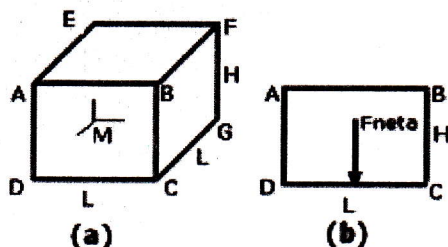


Figura N° 2

De acuerdo a lo anteriormente visto, la fuerza neta, resultante de las presiones que se ejercen sobre la cara inferior DCGM será, figura N° 2 (b):

$$F_{\text{NETA}} = H d g S = H d g L^2$$

Realizamos el siguiente razonamiento:

Podemos calcular el peso del fluido contenido en el recipiente, llamamos M a la masa de fluido:

$$\text{Peso} = M \cdot g = \text{Volumen} \cdot d \cdot g = L^2 H d g$$

Podemos comprobar que para el caso analizado, el peso del fluido contenido en su interior es igual a la fuerza neta que las presiones ejercen sobre su base.

Un alumno «atento e inquieto» puede, en este momento, realizar la siguiente pregunta: «Profesor, si el recipiente tiene otra forma, por ejemplo la que se muestra en las figuras N°3 (a) y (b), la fuerza neta sobre el fondo es la misma pero el recipiente contiene menos líquido y por tanto pesa menos, ¿Cómo se explica?».

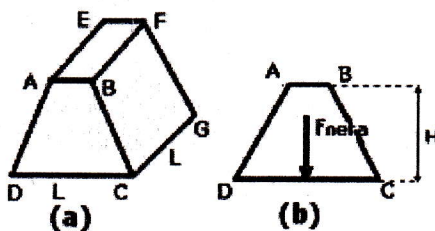


Figura N° 3

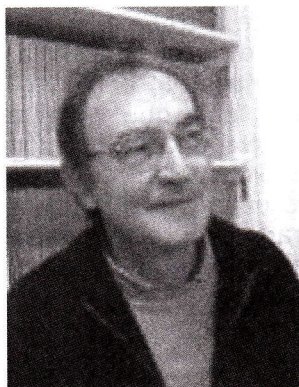
Este punto será analizado en el próximo número de la revista.

¹ La resultante de las fuerzas originadas por la presión atmosférica actuando sobre las paredes exteriores del recipiente y sobre la superficie libre del fluido, es el empuje correspondiente al principio de Arquímedes.

ENTREVISTA AL DR. ISMAEL NÚÑEZ

Prof. Isabel Acland

Entrevista realizada el 27 de febrero de 2012.



El doctor Ismael Núñez obtuvo en 1993 la Licenciatura en Física en la Facultad de Ciencias de la Universidad de la República (UDELAR), Uruguay. En 1996 obtuvo la Maestría en Física, Facultad de Ciencias de la UDELAR, Uruguay. Título de su tesis: «Estudio de campos ultrasónicos por métodos ópticos de alta resolución».

En el año 2000 obtiene el Doctorado en Física en la Facultad de Ciencias, Udelar, Uruguay. Título de la tesis: «Generación de ondas de Lamb. Funciones de Green y su aplicación en los procesos de Inversión Temporal Acústica».

En el año 2001 obtiene el Doctorado de Física Acústica (Doctorat d'Acoustique Physique) en la Université de Paris VII, Francia. Su tesis: «Génération d'ondes de Lamb. Les fonctions de Green et leurs applications aux processus de Retournement Temporel en Acoustique».

Actualmente es Profesor Agregado del Instituto de Física de la Facultad de Ingeniería de la UDELAR, grado 4, con dedicación total.

También se desempeña en el Programa de Desarrollo de las Ciencias Básicas (PEDECIBA) del Uruguay como Investigador grado III con dedicación total, en donde es responsable del Laboratorio de Análisis Óptico de Vibraciones.

Es investigador Nivel II del Sistema Nacional de Investigadores del Uruguay¹.

Dado que Ismael Núñez generó y mantiene un fuerte vínculo con los docentes de Física de Enseñanza Media, decidimos hacerle algunas preguntas de tono informal. Fuimos a visitarlo al Instituto de Física de Facultad de Ingeniería.

Con formación de maestro, te iniciaste en Tacuarembó, también allí trabajaste como docente de Física. ¿Qué fue lo que te llevó a ser investigador?

Eso fue por aventurero (sonrisa). Siempre me gustó la tarea docente e intuía que tenía cierta habilidad para explicar cosas a la gente. En Tacuarembó con ese perfil solo existía Magisterio. No quería venir a Montevideo, era una época complicada, fines del '60, comienzo de los '70, además no tenía sustento propio, fue una decisión básicamente económica. Tuve muy buenos docentes en Magisterio en Tacuarembó, era la época pre-desarticulación del sistema. Me recibí. En ese entonces ya me gustaba la ciencia y también la filosofía. En esa época era importante tener cierto conocimiento

¹ Podrán ver su currículum completo en la página web del Sistema Nacional de Investigadores: <http://www.sni.org.uy/>

acerca de las posiciones filosóficas que tenían influencia política (el materialismo, el idealismo). Había que leer a Hegel, a Marx. En ese contexto, hice magisterio, ejercí un par de años, y en cierto momento surgió la posibilidad de hacer una suplencia en un curso de física de 3º del liceo de Tacuarembó. Allí me fue a visitar como Inspector Mario Guerra. Me vio dar la clase y le gustó. Me preguntó si no quería venir a Montevideo a seguir estudiando. Dije que sí (risas), claro que me quería venir. Aparecieron horas en el Bauzá y caímos varios, no solo yo. Entre otros llegaron Juan Correa, Pablo García, con los cuales daba gusto trabajar, gente con una profundidad de conocimiento extraordinaria. Ahí comencé a trabajar y luego me anoté en la Facultad de Humanidades y Ciencias a hacer la licenciatura. Seguí trabajando en Secundaria aún haciendo la Maestría, pero llegó un momento que fue difícil, entre otras cosas porque tenía que viajar a Francia y tuve que dejar la actividad en liceos. Obtuve una dedicación total en la UDELAR a fines de los 90'. En el 2000 defendí mi tesis de doctorado, alternando entre Francia y Uruguay. En resumen, hice la licenciatura en Física, la maestría en Física y el doctorado cotutelado entre Francia y Uruguay. Acá mi codirector fue Carlos Negreira y allá mi codirector fue un francés llamado Mathías Fink.

¿Tienes dos doctorados?

Sí, pero es circunstancial. Hice mi doctorado en Francia, con el programa francés y simultáneamente me inscribí en el doctorado en Uruguay, aceptaron mi inscripción sabiendo que lo estaba haciendo en Francia. En Francia el título es de Física Acústica (Acoustique Physique) y acá es de Física. Tengo dos títulos de doctorado pero no estudie el doble.

¿Qué te llevó a ser un Físico Experimental?

Tuve guías de determinadas personas que me llevaron por ese camino, Carlos Zamalvide fue uno de ellos. Cuando entré en la licenciatura él estaba trabajando. En algún momento de mis estudios tuve alguna duda y fue Zamalvide quien me aclaró que por un lado estaba la Física Teórica y por otro la Física Experimental y que debía elegir un camino. Elegí la Física Experimental. Es la anécdota que tengo para contar de por qué soy un Físico Experimental o mejor dicho un Físico Aplicado, que no es lo mismo.

¿Es más complicado ser un físico experimental que un físico teórico o requiere mayor esmero?

No. Lo preguntas pensando en que es más complicado porque te enfrentas al mundo real. Creo que no es así. Creo que va en cuestión de gustos. A mí me gustan las dos cosas, tanto la física teórica como la física experimental. Me incliné más por la física aplicada (más que experimental, hay una diferencia).

¿Cuál es la diferencia?

Una posible clasificación es decir que la física es **básica** o es **aplicada**. Básica no significa elemental, quiere decir **fundamental**. Dentro de la física básica está la teórica y la experimental.

En ambos casos, lo que se hace es contrastar o elaborar o proponer o derribar teorías que han sido propuestas por otros, esto lo hace tanto el

físico teórico como el físico experimental. Uno lo hace con teoría y el otro lo hace en un laboratorio. Ellos buscan contrastar alguna teoría. Por ejemplo la gente que trabaja en los aceleradores de partículas son físicos experimentales, pero buscan contrastar una nueva teoría, alguna nueva partícula, etc. Por otro lado está la física aplicada, que también tiene teóricos y experimentales. Por ejemplo el área de la óptica tal como la estudio es aplicada. No me ocupo de las teorías fundamentales ni de contrastar teorías. Me ocupo de aplicar la física, esto implica cierta elaboración teórica, además de lo experimental, pero no de teoría fundamental sino de aplicación.

La investigación que implica labor experimental, conlleva dificultades adicionales con relación a la labor puramente teórica pues requiere de instrumental en general muy costoso. ¿Las partidas presupuestales o fondos para proyectos, atienden especialmente este punto o aparecen problemas al repartir fondos entre diferentes grupos de investigación, teóricos y experimentalistas?

Siempre es más difícil obtener fondos para laboratorios de investigación. No obstante, la política implementada desde hace unos años por la Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC) de la UdelAR y por la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) es la de otorgar los fondos por proyectos. Yo creo que los evaluadores actuales están manteniendo un buen criterio de equilibrio y se están otorgando fondos razonables ante los proyectos experimentales de utilidad nacional.

¿Cuáles fueron los hitos en tu carrera, lo más destacable para ti personalmente?

Lo que más destaco son los desarrollos teóricos logrados para fundamentar los resultados experimentales de la física aplicada.

Por ejemplo en 2007 hemos publicado un par de artículos con el físico José Ferrari: *Differential operator approach for Fourier image processing*. Ismael Núñez and José Ferrari, J. Opt. Soc. Am. A/Vol. 24, No. 8/August 2007, pp. 2274-2278 y *Bright vs. dark Schlieren imaging: Quantitative analysis of quasi-sinusoidal phase objects*. Ismael Núñez and José Ferrari, Applied Optics, Vol. 46, No. 5, 10 February 2007, pp. 725-729.

En estos destaco un trabajo sobre objetos de fase, un fundamento teórico para explicar ciertos métodos (un operador diferencial) para procesar imágenes con la óptica de Fourier y otra explicación sobre un método (Schlieren) en el cual se puede ver el frente de onda que viene modulado, torcido por algún motivo y que obviamente no se ve si no se busca una forma de transformar esa variación de fase en una variación de intensidad. (En óptica solo se pueden «ver» las intensidades luminosas). A pesar de que no fuimos los únicos que abordamos ese tema, lo importante fue que logramos una interpretación nueva y formalmente distinta del fenómeno; un desarrollo teórico que permite interpretar el resultado experimental. Hubo que desarrollar la teoría que sustentaba el fenómeno experimental observado. Ahí hubo un par de hitos.

Otro hito es mi tesis de doctorado. No tiene que ver con óptica. Tiene que ver con la generación de ondas en placas delgadas, metálicas o no, por ejemplo las formadas en la superficie del agua o un gel.

En placas delgadas del orden de la longitud de onda, al excitar se forman ondas mecánicas llamadas ondas de Lamb. Son complicadas porque generalmente son ondas dispersivas (es decir que la velocidad de la onda depende de la frecuencia, entonces al enviar un pulso, como las altas frecuencias viajan a una velocidad y las bajas frecuencias a otra, el pulso se deforma. Lo que logré fue un modelo, encontrar una función de Green (es una función que permite, dada una excitación arbitraria, conocer la respuesta en otro punto). [1]

Normalmente esa función de onda de Green es diferente en cada problema y hay que buscarla. Es una función complicada, que puede resolverse solo con un computador mediante análisis numérico. Yo la encontré para la propagación de ondas en láminas finas. Ese fue el tema del doctorado en Acústica Física. Como dije antes, esto es física aplicada, no hay leyes nuevas detrás, simplemente es una nueva interpretación de los fenómenos o un camino más sencillo para explicarlos.

¿En qué estás trabajando hoy día?

Estamos fundamentalmente trabajando sobre dos áreas.

1. Estamos estudiando vibraciones mecánicas por métodos ópticos, para aplicar fundamentalmente a superficies vibrantes, en **frecuencias audibles**. Por ejemplo en instrumentos musicales, ópticamente se podría ver como vibra la caja acústica de un violín. El instrumento fundamentalmente utilizado es el interferómetro. Este estudio está relacionado al hecho que desde el año 2009, estoy dictando aquí en Facultad de Ingeniería, un curso opcional «Acústica». Es política del Instituto que cada investigador dicte un curso diferente.
2. Por otro lado estamos elaborando un proyecto conjunto con el Dr. Ing. Pedocci del Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA), el Dr. en Biología Luis Aubriot del Instituto de Limnología de Facultad de Ciencias. El tema es la búsqueda de un método para controlar con ultrasonido la proliferación de cianobacterias (algas verdeazuladas tóxicas) en lagos. Habría que investigar por qué determinadas frecuencias de ultrasonido (rango entre 50-60 kHz hasta 1 MHz) destruyen a las cianobacterias y otras bacterias no. Actualmente se tratan las aguas con métodos químicos, con ultrasonido sería más barato e inocuo, ya se han hecho experiencias que funcionan, hay publicaciones de 2011, pero todo es muy nuevo y hay que investigar.

Ahora que se discute sobre la enseñanza..., ¿Cuál sería tu opinión acerca de la enseñanza de la Física o la Ciencia?

Insistiría sobre la enseñanza de la ciencia. Sería bueno que algún día se pudiera hacer un debate despegado de la ideología política. Se observa que a veces se niega alguna propuesta según de dónde o de quién provenga. Esto es una lástima. En general habría que investigar que se hace en el resto del mundo, en donde la enseñanza de la ciencia parece que va bien. Comenzaría en Primaria, por la **formación en ciencia** de los maestros, que creo que es pobre. Se trataría no de dar gran profundidad, sino de generar una actitud de desprejuicio hacia la ciencia, de quitar el miedo a los maestros. Por ejemplo inducir a que los maestros usen instrumentos, por ejemplo usar un microscopio para enseñar «célula» es mucho más rico que usar solo un cartel.

¿Te parece adecuado que los investigadores colaboren y tengan más contacto con los docentes de Primaria y de Enseñanza Media?

Sin duda. Es importante, ya ha habido experiencias. Debería estar instaurado en el programa de formación, institucionalmente. Deberían caer algunos prejuicios instaurados.

Hay un proyecto que está por salir, en el que participé, que involucra a Facultad de Ingeniería, Ciencias y ANEP, en el que la UDELAR provee de cursos de Física y Anep en contrapartida colabora con la parte Didáctica y Pedagógica. Sería un posgrado que se llamaría Diploma de Profundización en Física para Docentes de Enseñanza Media.

También hay que incentivar la investigación educativa.

¿Conoces la experiencia de docencia en Ciencia en otros países?

No. Parece ser, según algunos indicadores, que Finlandia o Noruega han alcanzado mejores niveles.

¿Es más difícil estudiar ciencia? ¿Cuál es tu opinión acerca de que la mayoría de los estudiantes no eligen ciencia?

No creo que sea difícil. Simplemente creo que los docentes no lo hemos hecho bien. Desde la primaria. Deberíamos combinar el docente expositivo, con el proactivo, hacer experimentos, adecuándonos a lo que le llegue más a los estudiantes. Hoy día los científicos tienen trabajo fuera de la Universidad, tanto en el ámbito público como en el privado.

Los docentes deberían trabajar más en investigación educativa.

Gracias Ismael.

Referencias:

- [1] Publicación de Ismael Nuñez: Generación y detección de ondas de Lamb en sólidos isotrópicos. Teoría y resultados experimentales (Editorial Académica Española, Berlin, 2011 - ISBN 978-3-8473-5629-5)

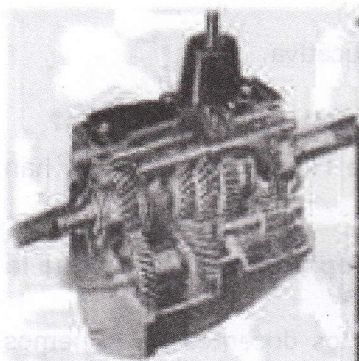
Resumen:

Las ondas de Lamb son ondas mecánicas (o acústicas) que tienen gran relevancia en los métodos para ensayos no destructivos en el estudio de materiales. Se propagan en placas delgadas (de espesor comparable a la longitud de onda) y este confinamiento entre las paredes próximas (guía de ondas) permite que viajen grandes distancias. Este libro presenta una síntesis de la extensa teoría desarrollada desde el siglo pasado sobre las ondas de Lamb en medios homogéneos. El trabajo expuesto apunta fundamentalmente al aspecto experimental sobre la generación y la detección de dichas ondas. Se analizan los principios físicos involucrados en varios métodos usuales para la emisión y el registro de las ondas de Lamb. Algunos de ellos han sido utilizados por el autor, exponiéndose los resultados obtenidos.

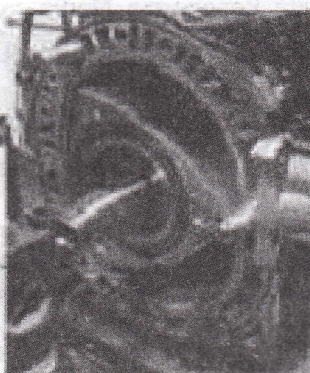
RECOMENDACIONES WEB

Animaciones especialmente útiles como elementos didácticos

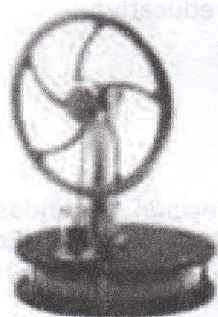
Aparecen dificultades de carácter didáctico al describir mecanismos con piezas móviles, cuyas posiciones, variables en el tiempo, son fundamentales para comprender su funcionamiento.



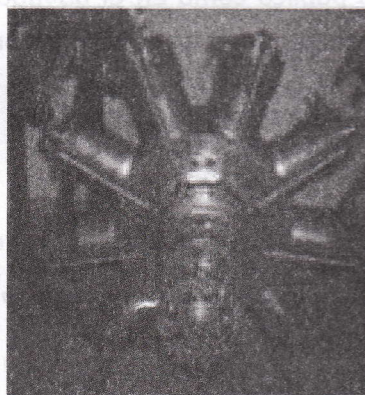
**Caja de cambios
sincronizada**



Motor Wankel



**Máquina Stirling
de bajo gradiente
de temperatura**



Motor Gnôme

Una animación en esos casos es, no ya un elemento didáctico complementario, sino un elemento fundamental.

Por ejemplo, muchas direcciones contienen animaciones correspondientes a motores de dos o cuatro tiempos ciclo Otto o ciclo Diesel, pero no abundan las direcciones que posean animaciones referidas a otro tipo de máquinas térmicas o dispositivos mecánicos.

Se adjuntan un par de direcciones donde se pueden encontrar veinticuatro animaciones con sus correspondientes textos complementarios explicativos que muestran, en forma muy clara, el funcionamiento de una gran variedad de mecanismos y máquinas térmicas. Entre ellas, aquellas que ilustran el funcionamiento de los dispositivos que se muestran en la figura.

<http://www.keveney.com/Engines.html>

http://www.taringa.net/posts/ciencia-educacion/11084704/Animaciones-de-mecanismos_mecanica_.html

...

EDUCACIÓN en FÍSICA

Revista de la Asociación de Profesores de Física del Uruguay

Volumen 8, Numero 2

Julio, 2012

CONTENIDO

EDITORIAL	3
RESEÑA DE LIBROS I	
<i>Mario Román Guerra Zabala</i>	5
PROCEDIMIENTO DE PRESENTACIÓN DE TRABAJOS	6
LA LEY DE AMPÈRE-MAXWELL Y EL CAMPO MAGNÉTICO DE UNA CARGA EN MOVIMIENTO	
<i>Álvaro Suárez</i>	7
UNA FACETA DIVERTIDA (Y MOJADA) DE LA FÍSICA: APRENDIENDO EN EL PARQUE ACUÁTICO	
<i>Arturo C. Martí, Cecilia Cabeza y Nicolás Rubido</i>	13
RECOMENDACIÓN WEB I	26
RESOLUCIÓN A "SITUACIONES PROBLEMÁTICAS EN FÍSICA (II)"	
<i>Carlos Zamalvide</i>	27
RESEÑA DE LIBROS II	
<i>Mario Román Guerra Zabala</i>	55
SITUACIONES PROBLEMÁTICAS EN FÍSICA (III)	
<i>Carlos Zamalvide</i>	57
ENTREVISTA AL Dr. ISMAEL NUÑEZ	
<i>Isabel Acland</i>	59
RECOMENDACIÓN WEB II	64