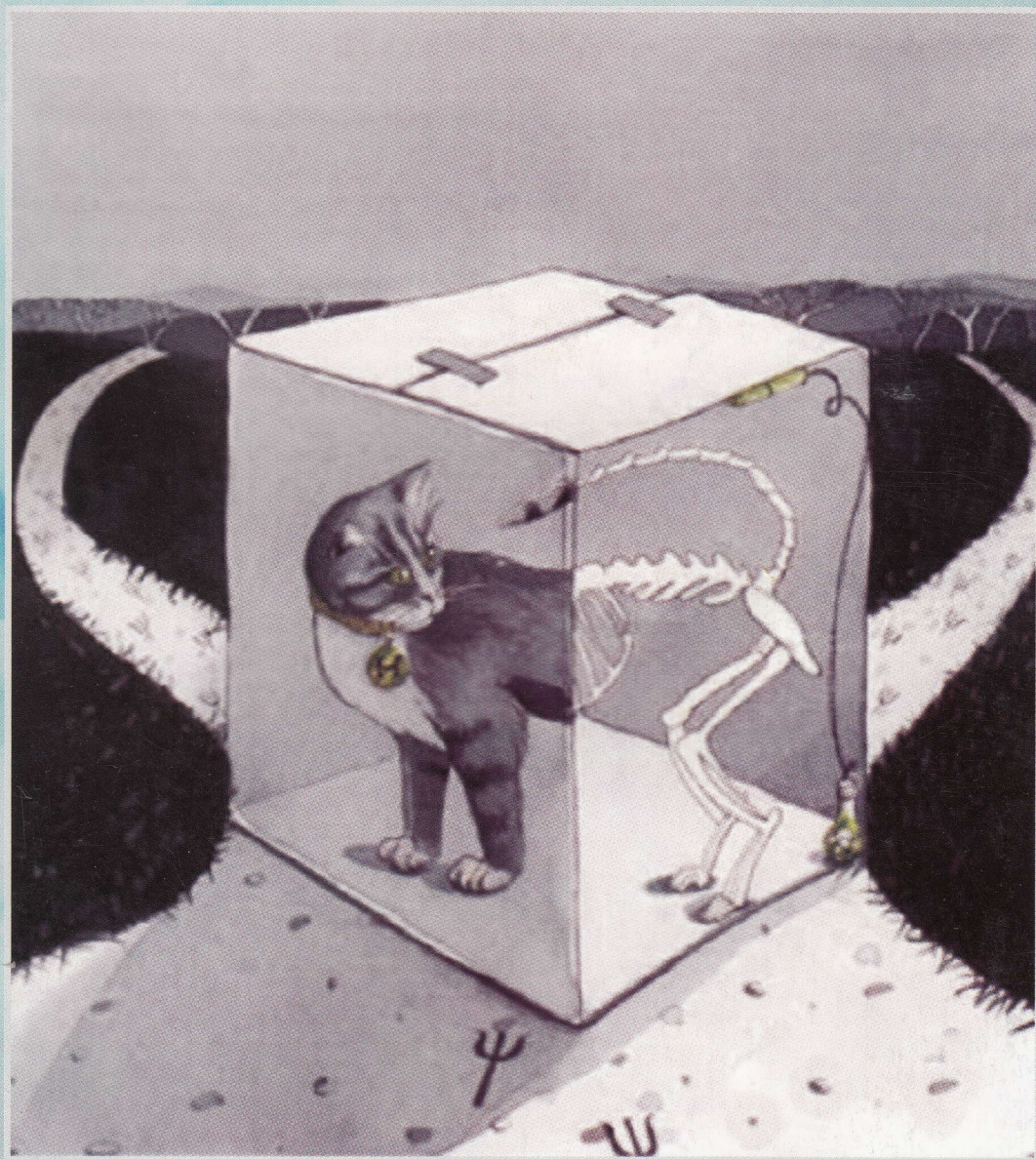


EDUCACIÓN en FÍSICA

ISSN: 0797-9045

Revista de la Asociación de Profesores de Física del Uruguay





EDUCACIÓN EN FÍSICA

Volumen 9 N° 9

Agosto 2010

Depósito Legal:

299222/10

Redactor Responsable:

Sandry Ramírez
sandry@gmail.com

Consejo de Redacción:

Mario Guerra
Ismael Nuñez
Carlos Zalmavide

Educación en Física es una revista de la Asociación de Profesores de Física del Uruguay, que se distribuye gratuitamente entre sus socios.

Comisión Directiva de la APFU:

Fernando Fontán
Carlos Zalmavide
Marta Marroig
Antonio López
Mauricio Rodríguez

Dirección de la Revista:

Av. 18 de Julio 1559 - Apto. 401
Montevideo CP 11200

Telefax: (+598) 2400 1258

E-mail:

revistaapfu@gmail.com

apfu@adinet.com.uy

Publica:

Ediciones IDEAS
Mercedes 1786
11200 Montevideo-Uruguay
Telefax: 2408 6985
E-mail: edideas@adinet.com.uy

M.E.C.:

Ed. amparada por Decreto 218/996



Portada:

Diseño: Mauricio Gonnet
Imagen obtenida en internet

12 tras 19 (a modo de Editorial)

Estimados colegas, lectores y amigos es esta una edición que cierra un ciclo para quien por 12 años colaboró en esta publicación desde su redacción, con el apoyo renovado tantas veces de varias directivas de la Asociación, con varios equipos de colegas y amigos, con poca y mucha colaboración de muchísima gente que puso su tiempo y energías para concretar las distintas ediciones.

Parece lejano aquel «examen de julio» donde Nita (Zoraida Viera) propuso, a este servidor, la redacción de la revista que venía adquiriendo creciente importancia entre los asociados. En principio se aceptó el reto con la condición de trabajar en equipo con los que estaban y con todo aquel que se quisiera sumar. ¡Menuda encomienda!

Pasó «mucha agua por debajo del puente» y por momentos se puso «intensa la cosa», 3 3 2 1 ... por año, mucho trabajo, muchas ideas plasmadas, muchas propuestas que no fueron y muchas que sí fueron y quedaron como secciones fijas, como secciones eventuales y como distribuciones de material por categoría temática. Que sean más.

Ha pasado el tiempo y se han propuesto cambios, sobre todo tendientes a cumplir con los requerimientos legales y técnicos mencionados en el artículo «Análisis de la revista científica Educación en Física» (Vol.7 Nro. 4; Julio 2007) y algunos giros respecto al formato de la publicación y sus contenidos; es así que desaparecen, *Física del Humor*; *Curiosos casos*, *Cosas curiosas*, *Miscelánea* y *Apostillas Físicas* entre otras para dar paso a un nuevo enfoque que tomará nuestra revista. Se agrega a su vez *Situaciones problemáticas en Física* que publica las soluciones en la edición siguiente y se «reflotan» los *Comentarios de libros*.

Para este profesor ha sido un honor el haber hecho un camino hasta aquí, quedan innumerables anécdotas y el placer del recorrido, pero obviamente no es un alejamiento, hay que seguir andando, haciendo camino, y con el agradecimiento hacia todos quienes estuvieron presentes, de una u otra forma, seguiré aportando y dando una mano, desde otro lugar, a esta publicación, es decir es un ¡hasta siempre! y que la Física los acompañe. *Nos vemos en Salto!*

Prof. Sandry Ramírez
Redactor responsable sal.

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>

MECÁNICA CUÁNTICA

Una teoría física revolucionaria

Mario Román Guerra Zabala

Universidad Católica del Uruguay - Facultad de Ingeniería y Tecnologías
Montevideo, Uruguay; e-mail: marioroman.guerra@gmail.com

Propósito:

La idea de redactar esta nota, surgió como consecuencia de la Jornada realizada en septiembre del 2009, y en la cual se tuvo la oportunidad de exponer algunos aspectos muy generales sobre la Teoría Cuántica.

La idea central, era realizar una explicación general, sin formalismos de por medio y en un lenguaje lo más llano posible, de algunos puntos destacados de esa gran concepción de la Física del siglo XX.

En la oportunidad mencionada y tampoco en ésta, será posible dar un panorama completo de la Mecánica Cuántica. El lector encontrará que faltan sin duda puntos esenciales que no estarán mencionados con el detalle que merecen. Entre ellos: el «principio de superposición» y su consecuencia más notoria: la «paradoja del gato de Schrödinger»; los «universos paralelos de Everett III», que ofrecen una alternativa al concepto de «colapso de la función de estado»; la «decoherencia cuántica», «entrelazamiento cuántico», «lógicas cuánticas»...

En consecuencia: lo que sigue es un planteo parcial de *solamente* algunos puntos (*también* tratados con limitaciones), pero que esperamos motiven a los lectores a realizar las ampliaciones del caso. Para ello, hemos mencionado algunas obras de consulta que se citan como bibliografía de apoyo.

Introducción

Aspectos Generales

Al desarrollar una introducción de Mecánica Cuántica, es usual comenzar la misma mencionando un conjunto de hechos experimentales que en su momento no fueron explicados a partir de las teorías vigentes en esa época. Algunos de estos hechos, son ampliamente conocidos:

- a. Los espectros asociados a los diferentes elementos conocidos, a partir de los exhaustivos y altamente precisos trabajos realizados por los físicos experimentales llamados «espectroscopistas», que no disponían de una teoría que los sustentara. Los datos experimentales revelaban regularidades estructurales y el sorprendente cumplimiento de ciertas «reglas empíricas» extremadamente sencillas, precisas y útiles.

Por ejemplo: una de estas reglas, revelaba la existencia de una dependencia entre la longitud de onda de alguna línea particular, con las longitudes de onda de otras líneas del *mismo* espectro. Concretamente, una combinación lineal adecuada de las segundas, expresaban el valor de la primera (regla de combinación de Ritz).

- b. Análogamente, el análisis de la interacción entre la radiación electromagnética y la materia, se ajustaba a dos leyes diferentes: una de ellas válida para frecuencias bajas (Raleigh-Jeans) y otra para

frecuencias altas (Wien). Los intentos de conciliación de los dos comportamientos en una *ley única*, utilizando los conocimientos derivados de la Teoría de Maxwell del siglo XIX, fracasaron, hasta donde se sabe, una y otra vez.

La explicación teórica de los espectros, se buscó en un terreno que los presocráticos (por otras razones) habían conjeturado: la «teoría atómica», que proponía la existencia de estructuras elementales eléctricamente neutras, a partir de las cuales se confeccionaba cualquier trozo material. Estas estructuras básicas se denominaron, como ya lo habían hecho los presocráticos, con el nombre de *átomos*¹.

Los «átomos presocráticos», *no* son los átomos de los cuales se hablará en los comienzos del siglo XX y en los tiempos posteriores. Para establecer esta conjetura, los físicos de fines del siglo XIX y comienzos del siglo XX, necesitaron tomar en consideración, algunos resultados ya establecidos. Entre ellos, el concepto de «electrón», concebido originalmente en un extraordinario trabajo *teórico*, por el físico holandés Hendrik Antoon Lorentz. Su hallazgo *experimental* se debe a John Joseph Thomson (Lord Kelvin).

Con este «componente de la materia», Thomson crea un modelo atómico eléctricamente neutro. Imagina para ello, una esfera con carga positiva *uniformemente* distribuida (densidad volumétrica de carga, *constante*), en cuyo interior los electrones realizan movimientos armónicos². Sin embargo, el modelo atómico de Thomson resultó insuficiente al *no* poder explicar las numerosas líneas espectrales que poblaban los espectros observados.

Experimentos posteriores, llevaron a la conclusión que, además, la carga

positiva y distribuida supuesta por Thomson, era inconsistente con los resultados obtenidos por Geiger y Marsden.

La evidencia experimental sugería que *si existía* una carga positiva, su distribución debía ocupar una región alrededor de 100.000 veces más pequeña que el tamaño atribuido al propio átomo³. Surge así una *nueva* conjetura: el átomo consta de una región concentrada de carga positiva (núcleo) y una región externa donde se deben mover los electrones en órbitas circulares⁴.

¹ La concepción «atomista» de Leucipo (ampliamente divulgada por su alumno Demócrito de Abdera, aunque ya en tiempos de Herón existían «concepciones atomistas»), *no* surge «para explicar el comportamiento físico de la materia» en el sentido que damos hoy a esta frase. La concepción «atomista» surge por razones filosóficas, pensadas con la finalidad específica de rebatir la concepción estática y opuesta al cambio, propuesta por Parménides y contraria a la concepción del «eterno fluir» de Heráclito. No está demás señalar en este lugar, que el «atomismo galileano» que originara el «gran conflicto teológico-científico del siglo XVII» casi veinte siglos después, se origina más en las concepciones de Herón que en las de Demócrito.

² Era necesario que existieran cargas aceleradas (se eligieron los electrones) como forma de generar la radiación electromagnética prevista por la Teoría de la Radiación de Maxwell. En el caso del átomo de hidrógeno, el modelo se concibió en forma extremadamente simple: una esfera con carga positiva distribuida con densidad volumétrica constante y un electrón que oscila diametralmente y armónicamente. En este caso, el sistema emite una *única* raya espectral de 1257 Å. Las restantes emisiones, *no* se registran, por lo cual el modelo se presenta como insuficiente.

³ Un aspecto sorprendente de las «dimensiones nucleares», es que estas no son «mucho mayores» cuando el número de nucleones es mayor. Los núcleos tienen dimensiones que oscilan entre $1,0 \times 10^{-15}\text{m}$ y $3,0 \times 10^{-15}\text{m}$.

⁴ Toda esta historia es ampliamente conocida. No obstante, la razón fundamental por la cual fracasa el «átomo de Rutherford», estriba en que un electrón en movimiento circular, al estar acelerado, debe irradiar energía, de acuerdo con lo establecido por Maxwell. En consecuencia, los electrones debían colapsar en el núcleo en un tiempo de orden 10^{-5}s , como se demuestra en forma elemental. Como consecuencia, la materia tendría una existencia inestable, lo cual no se observa. Para «resolver» este problema,

Para describir la interacción de la radiación con la materia mediante una teoría «razonablemente coherente», Planck recurre al concepto de «radiador elemental». Una entidad que es capaz de *emitir* y *absorber* en cantidades de energía distribuidas en un conjunto discreto de las cantidades (h.f), donde «h» es una constante universal y «f» la frecuencia de oscilación.

Considerados desde *este punto de vista*, los intentos pre- cuánticos de explicaciones (que se extienden desde 1900 hasta aproximadamente 1923), persiguen un fin concreto: confeccionar un marco teórico «*satisfactorio*», que cubra de «*alguna manera*» la *casuística de lo observado experimentalmente*.

La introducción del concepto de cuantificación del momento angular orbital que realiza Bohr, y su consecuencia cuantitativa inmediata, la cuantificación de la energía para el electrón hidrogenoide ligado, es «un recurso adecuado» para explicar ciertos hechos. La modificación que introduce Arnold Sommerfeld⁵ a la teoría original de Bohr, trata de explicar, la razón por la cual las «líneas espectrales», tienen a su vez, «estructura fina». Cuando la nueva teoría introduce el concepto de «cuantificación», las razones **no** son diferentes a las que motivaron *anteriores* ampliaciones teóricas⁶.

La Mecánica Cuántica, **no** es *solamente una teoría que «arregla conflictos entre teorías ya aceptadas y hechos experimentales que las contradicen» o no encuadran en ellas. Tampoco es una teoría confeccionada para explicar «ciertos fenómenos particulares» (aunque en su origen, así haya sido).*

Se trata de una teoría que introduce interpretaciones **completamen-**

te nuevas, que nos obliga a renunciar a las interpretaciones intuitivas (tan importantes en el contexto clásico), y que nos impone la adopción de un lenguaje *formal* diferente a todo lo conocido con anterioridad (álgebra no conmutativa, aspectos lógicos *esencialmente* diferentes a los «tradicionales»...). A ello, se agrega la supresión de conceptos clásicos, fenomenológicos, intuitivos y extraordinariamente arraigados. Todo ello conduce a profundas modificaciones epistemológicas que modifican nuestra forma de **interpretar** el mundo físico⁷. Entre ellas el clásico «determinismo causal» que pierde su relevancia como «herramienta epistémica estructural de la teoría».

Bohr plantea una conjetura complementaria: los electrones se pueden ubicar en *órbitas circulares* tales (estacionarias), donde **no** irradian. La radiación solamente se produce, si los electrones cambian de órbita estacionaria. El modelo de Bohr (un modelo pre-cuántico), es una estructura híbrida, donde hay elementos de dinámica clásica «mezcladas» con nuevas ideas de «cuantificación discreta» (aplicada como es sabido al momento angular orbital del electrón). A pesar de estos y otros inconvenientes insalvables, el modelo de Bohr, logra explicar las líneas observadas en el espectro del hidrógeno y sus longitudes de onda asociadas, con precisión «muy aceptable». No le acompaña la misma suerte, cuando el átomo está integrado con mayor número de electrones.

⁵ Arnold Sommerfeld, fue un eminente físico alemán que realizó aportes de gran importancia en diversos campos. En la búsqueda de una explicación «sensata» para la existencia de «estructura fina» de las resonancias emitidas por un átomo en sus transiciones, introdujo el llamado «principio de cuantificación de Sommerfeld-Wilson», que permite determinar que para cada energía asociada a los diferentes estado estacionarios existen, en principio, diversas órbitas.

⁶ Este es el caso de la Relatividad Especial, que trató de resolver el conflicto entre la Mecánica de Newton y el Electromagnetismo de Maxwell, que se revelaron como teorías contradictorias. La revisión de Einstein, modificó conceptos clásicos muy arraigados sobre el espacio y el tiempo, creándose de esta forma una «teoría sustitutiva sobre nuevas bases», que resolvía los conflictos.

⁷ No obstante, el espectro de modificaciones conceptuales que introduce la Mecánica Cuántica se extiende a ámbitos en *aparencia* tan alejados como la Economía, la Sociología, la Psicología,...

La Mecánica Cuántica modifica la posibilidad ilimitada de acceso a la medida simultánea de dos magnitudes cualesquiera que nos propongamos. En realidad, modifica **sustancialmente** el concepto de «medida» que generalmente se entiende en el contexto clásico.

La teoría cuántica rechaza, en definitiva, la visión ingenua y fenomenológica de la naturaleza que proponen las teorías clásicas, e instala en su lugar, un formalismo respaldado en algunos aspectos *que no tienen precedentes*⁸:

- Una limitación en nuestras posibilidades de lograr *certezas*;
- La introducción del «azar» y de su teoría matemática (Probabilidad) como lenguaje formal;
- La consecuente necesidad de introducir una lógica diferente, donde el «principio del tercer excluido» no es universalmente válido.

Estas modificaciones, implican a su vez un problema colateral de importancia. Es necesario establecer si los nuevos recursos, son solamente un *lenguaje* descriptivo (y entonces son elementos gnoseológico) o por el contrario son *constitutivos* de la propia naturaleza (en cuyo caso son elementos ontológicos de la misma).

I. ¿En qué contexto nace la Mecánica Cuántica?

Los forjadores de la teoría cuántica provienen esencialmente de Alemania, Dinamarca y Austria: el antiguo Imperio Austro-Húngaro. En los comienzos de la década de los años 20 del siglo anterior, los creadores de la Mecánica Cuántica convivieron con la derrota y disgregación del mencionado Imperio, y al mismo tiempo, experimentaron la caída de gran parte de sus arraigadas convicciones filosófi-

cas y epistemológicas. La causalidad, la seguridad, la «naturaleza ordenada», fueron aniquiladas por un contexto social y político que cayó a pedazos.

Muchos jóvenes de ese tiempo, buscaron en otras doctrinas (existencialismo, pragmatismo, empirismo lógico) la posibilidad de restablecerse y reconstruir sus ideas. Ello condujo a un acto de negación hacia el «omnipotente racionalismo causal y determinista», así como la metafísica tradicional. Se valorizan conceptos tales como el libre albedrío, la negación del determinismo mecanicista y la causalidad metafísica.

En particular, no debemos olvidar que ésta última, ya venía «malherida» desde la crítica escéptica realizada dos siglos antes por Hume.

No es un hecho casual, que los creadores de la Mecánica Cuántica (Bohr, Heisenberg, Schrödinger, Born,...) fueran atentos lectores y avezados conocedores de la «Decadencia de Occidente» (obra famosa escrita por Oswald Spengler)⁹.

Esta obra, desarrolla un relato oscuro, **crítico y desgarrador**, desde el cual se *trata de explicar*, con una

⁸ Cabe recordar en este punto, a Henry Adams (1838- 1918), advirtiendo en primer lugar, que la palabra «caos» no tiene el significado que hoy se le atribuye en el contexto de la Física: «El caos es la ley de la naturaleza; el orden el sueño del hombre». Una visión premonitrice, que nos advertía sobre posibles limitaciones en el acceso al conocimiento cierto. El concepto de «azar» que introduce la Mecánica Cuántica, ya se había utilizado en teorías clásicas (la Termodinámica Estadística del siglo XIX, por ejemplo). Sin embargo, el concepto de «azar», se introduce en uno y otro caso, *por razones esencialmente diferentes*.

⁹ «La Decadencia de Occidente» (Bosquejo de una Morfología de la Historia Universal)- Oswald Spengler- [Existe una versión en habla hispana (realizada a partir de la traducción del alemán elaborada por Espasa- Calpe) en dos tomos por Editorial Planeta- Agostini, (1993) en la colección «Obras maestras del Pensamiento Contemporáneo»]

visión germánica, lo ocurrido en el campo de batalla durante la Gran Guerra¹⁰.

Era necesario pensar todo de nuevo, ya que el mundo ordenado y causal, había colapsado. La posición de los científicos creadores de la Mecánica Cuántica, **no** es un hecho aislado. Es un impacto social generado en el primer tercio del siglo XX, donde «finaliza un mundo» y «nace otro».

Los físicos que confeccionan la Mecánica Cuántica, desarrollaron sus actividades afiliándose en líneas generales a un contexto filosófico *existencialista*. Por ello, la escuela de Kierkegaard, tuvo en la formación de estos científicos, una *influencia decisiva*¹¹ y se halla presente en muchas de las opiniones sostenidas. Es probable que esta línea existencialista se evidencie más claramente en la sólida formación intelectual de Bohr que en los restantes miembros.

En esa misma época, se producen cambios fundamentales en el Arte Pictórico: el «Arte Abstracto» continúa a la gran reforma iniciada por los impresionistas y continuada posteriormente por los neo-impresionistas. Ahora el detalle y lo figurativo, no son de importancia tan fundamental como antaño. Interesa el conjunto, la coherencia cromática, el equilibrio estético de las formas en la totalidad y el efecto que la obra genera en el observador, *como parte inseparable de lo observado*.

La consideración de una porción de la obra, no permite en general concluir sobre el total. Se plantea un conflicto directo con la separación en sectores de las partes de la obra¹². Hay una ruptura fundamental con todo lo anterior.

En un tiempo de grandes cambios, difícilmente la Física que **siempre** promovió cambios, podía permanecer al margen. Cuando comprendemos es-

tos puntos señalados, concluimos sin dificultad, que la Mecánica Cuántica es «mucho más» que una teoría física exitosa, que describe con precisión una serie de fenómenos donde las teorías clásicas fallaron.

II. Aspectos de la Teoría Cuántica. Función de onda. Paradoja EPR

Veamos ahora con cierta especificidad, aspectos básicos de la Mecánica Cuántica.

La Física *pre-cuántica* se construye con diversas conjeturas¹³. Entre ellas, cabe señalar tres de gran relevancia:

¹⁰ Un análisis excepcionalmente lúcido de estos aspectos, se pueden consultar en la notable obra «Weimar Culture: Causality and Quantum Mechanics (1918- 1923)» del autor Paul Forman. Existe traducción al habla hispana de esta obra realizada por Editorial Gedisa.

¹¹ La doctrina existencialista tiene diferentes aristas y perfiles. Prescindiendo de los detalles técnicos de esta importante y compleja corriente de pensamiento, nos centraremos solamente en uno de sus más conspicuos representantes: Soren Kierkegaard. Este pensador, comunicaba al mundo sus ideas y posiciones a partir de *parábolas, relatos, diarios personales*,..., en lugar de los voluminosos tratados que siempre caracterizaron a los «filósofos profesionales». Pensaba que los filósofos se engañan, cuando pretenden proclamar «verdades (supuestamente) universales». Para Kierkegaard, *la verdad es eminentemente personal*. Con ello se opone radicalmente (como posteriormente lo hará Bertrand Russell en «The History of Western Philosophy») al concepto de Absoluto que proclama Hegel. Hay en este lugar, por parte de los físicos cuánticos una adopción de la importancia relevante de la interacción observador/ sistema.

¹² Si se examina una obra pictórica clásica (por ejemplo: una obra de Velásquez), la técnica del detalle es la misma que la de las restantes partes y a partir de una pequeña región del cuadro, es posible en muchos casos extrapolar el contenido de toda la obra. En una obra moderna, en general, esto no es posible. El significado se asocia a la totalidad.

¹³ Las suposiciones son de naturaleza muy diversa. Hay supuestos que se refieren a los aspectos topológicos del espacio y el tiempo; hay supuestos de naturaleza fenomenológica; hay supuestos que tiene relación con aspectos epistemológicos fundamentales (la validez de la causalidad como categoría exclusiva del determinismo,...).

- a. Se acepta que los sistemas físicos tienen «**propiedades**». Éstas son atributos cualitativos o cuantitativos del sistema y pre-existen al conocimiento que de ellas tiene el observador, cuando se realiza una «medida». El instrumento de medida es un nexo, un puente, entre el observador que desea conocer «algo que está allí y es propio del sistema». Es evidente, que a menos que establezcamos esta opinión con carácter de hipótesis, prescindiendo de la medida en sí, no estamos realmente autorizados a suponer que una determinada propiedad «existe».
- b. Dado un sistema, es posible «**separarlo**» en partes para su análisis». Esta hipótesis, se conoce generalmente como «principio de separación»¹⁴. La utilización de este «principio» es general, habitual y *muy preciso en determinados contextos clásicos*. Cuando examinamos el movimiento de un sistema, Newton nos enseña que la confección del «miembro fenomenológico» se logra *separando al cuerpo de su entorno y sustituyendo «las influencias de éste último» por fuerzas y torques adecuadamente ubicados*.
- c. La interpretación de la naturaleza, a partir de leyes clásicas, no exige ni «**relaciones de incertidumbre**» ni un «**principio de complementariedad**». La primera afirmación, nos dice que no hay en el contexto clásico, inconvenientes ni limitaciones de clase alguna, para medir simultáneamente cualquier pareja de magnitudes (observables) que deseemos. En particular: los observables «posición» y «momentum lineal» se pueden conocer con las precisiones que se deseen (limitadas solamente por el instrumental utilizado y la técnica de medida elegida) en cualquier instante. La segunda afirmación se refiere a un aspecto general de los entes de la naturaleza, que pueden inseparablemente y excluyentemente manifestar sus propiedades ondulatorias o corpusculares según el experimento que se realice. En el contexto clásico, todos los fenómenos se pueden explicar como «leyes de partículas» o «leyes de ondas» en forma excluyente y separada. Dicho de otro modo: no es posible, mediante una modificación del ingenio experimental, revelar que «algo» se pueda manifestar con aspectos de «partícula» o aspectos de «ondas».
- d. Finalmente, la Mecánica Cuántica introduce un «**principio de superposición de estados**». ¿A qué se refiere este principio? La descripción física de un sistema, se basa en la introducción de un concepto específico de la Mecánica Cuántica, denominado «**función de onda o vector de estado del sistema**»¹⁵. Generalmente, esta función se representa como una función (generalmente compleja) de la posición de las partes (1, 2, 3, ..., i, ...) del mismo y del tiempo¹⁶: $\Psi(\mathbf{r}_i, t)$.
- Esta función, encierra **toda la información física del sistema** y permite determinar **todas sus magnitudes asociadas**, mediante un formalismo

¹⁴ La Física pre-cuántica utiliza este principio metodológico en forma sistemática. Newton lo designa como «dissecare naturam».

¹⁵ La denominación «vector de estado» se origina en una forma de establecer el formalismo cuántico, donde la función de onda se define a partir de un álgebra **no** conmutativa definida en un espacio denominado «espacio de Hilbert».

¹⁶ En realidad, la descripción de un sistema cuántico, se puede realizar con la función de onda $\Psi(\mathbf{r}, t)$ o con su función dual $\Phi(\mathbf{p}, t)$, dependiendo del momentum y el tiempo. Esta función y la original se corresponden mediante un importante teorema denominado «transformación de Fourier».

matemático pre-establecido por la teoría. Posteriormente, al plantear el fenómeno de interferencia de fotones que pasan por dos rendijas (experimento de Young) veremos con más claridad este punto.

1. Propiedades

La existencia de «propiedades» en los cuerpos, es un supuesto de origen aristotélico avalado por toda la corriente filosófica medieval. Se supone que existen dos clases de propiedades: «*primarias*» y «*secundarias*».

Las primeras, son aquellas que tienen el *sistema* y *cada una* de sus partes con carácter fijo. Las llamadas «propiedades intensivas» y «extensivas», son de esta clase. Newton introduce dos «propiedades primarias fundamentales» en su teoría mecánica: las masas inercial y gravitatoria¹⁷. En la teoría electromagnética, la permitividad eléctrica y la permeabilidad magnética, son «propiedades primarias».

Las «propiedades secundarias», son *accidentes* de los diferentes sistemas, que no forman parte de su naturaleza fundamental. El «color», se considera como una propiedad de esta clase.

Esta posición, presupone que las «propiedades», son aspectos que pertenecen a los sistemas. Son «algo que está en los cuerpos» y pueden conocerse mediante operaciones que realicemos sobre ellos. Las medidas, son resultados que reflejan cuantitativamente esas propiedades (cuando son «propiedades cuantitativas»). Desde este punto de vista, las propiedades existen independientemente de que midamos o no.

Cabe examinar si la clasificación en propiedades *primarias* y *secundarias*, que plantea el pensamiento clásico, es correcta. En realidad, es posible encontrar «propiedades» que no son

clasificables en ninguna de esas categorías.

La propiedad «hundirse en un líquido de un cuerpo aglomerado» no es primaria. La razón estriba en que el cuerpo *puede flotar o hundirse* según la naturaleza y densidad del líquido considerado. Tampoco es secundaria, ya que no es un *accidente fijo* que se mantenga independientemente del líquido elegido.

La Mecánica Cuántica **no** comparte esta visión clásica. El concepto de propiedad, en este contexto, es el resultado de una interacción *premeditada y preparada* por el observador (un experimento planificado), mediante la cual se «convoca a la misma», realizando operaciones concretas. Si «hacemos esto», el sistema responde «esto otro». Si modificamos la operación, cambiamos «la pregunta» y el sistema proporciona otra respuesta.

No estamos autorizados a suponer que aquello que se obtiene como respuesta, pre-existe a la operación que planteamos¹⁸. En este punto, cabe señalar un aspecto que distingue cla-

¹⁷ Newton observa un hecho: para acelerar un cuerpo, es necesario aplicar una fuerza neta. No obstante, fuerzas «iguales», generan sobre cuerpos de diferente naturaleza, en general, diferentes aceleraciones. Para ello introduce una propiedad primaria (masa inercial), que es responsable de la necesidad de aplicar una fuerza neta para provocar un cambio de velocidad. Un hecho diferente, es que todos los cuerpos del Universo se aplican fuerzas mutuas (gravitación). Para describir este hecho diferente del anterior, Newton atribuye a cada cuerpo una «masa gravitatoria» que es responsable que cada cuerpo sea capaz de atraer a otro y a su vez, ser atraído por otros. Newton verificó, (pero no explicó la posible razón), que cuantitativamente, las dos propiedades primarias se asociaban a cantidades proporcionales, en todos los cuerpos.

¹⁸ Esta postura responde a la conocida posición tradicional de la Escuela de Copenhague, según la cual, la construcción de la teoría solamente puede realizarse a partir de «observables». Einstein siempre discrepó con esta posición, dado que sostenía que las teorías *deben incluir necesariamente* elementos que no son «observables». En este caso, la propia teoría se construye con una finalidad concreta y es la que sugiere qué es lo que se puede medir.

ramente a la Mecánica Cuántica de la Física pre-cuántica.

En la Física clásica (incluida la Relatividad), se introduce el concepto de «observable», como sinónimo de aquello que medimos (velocidad, aceleración, masa, energía, momentum,...). Cada una de estas magnitudes, son los «observables del sistema».

La situación es completamente diferente en el cuadro cuántico.

A cada sistema se asocia una función denominada «función de onda», que generalmente depende de las coordenadas de los constituyentes del sistema y del tiempo. En este caso, los «observables» se obtienen mediante operaciones algebraicas («operadores» o «matrices») que aplicadas a dicha función «arrojan respuestas cuantitativas». Estas respuestas, son los «observables»¹⁹.

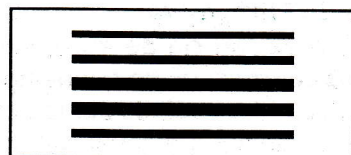
En este punto, existe un hecho fundamental: *a cada observable le corresponde un «operador asociado», que aplicado a la función de onda del sistema, permite hallar la magnitud en cuestión.*

2. Complementariedad e incertidumbre

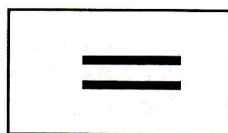
Uno de los primeros fenómenos que revelaron claramente que «las cosas no marchaban bien» en la Física Clásica, fue el conocido «efecto fotoeléctrico», notoriamente observable cuando (dicho en términos muy generales y sin profundizar en el punto) un haz de luz incide sobre un metal, generándose *electrones de emisión*²⁰. El descubrimiento esencial consiste en comprobar que la energía de los electrones emitidos es directamente proporcional a la frecuencia de la luz excitadora. Asimismo, la constante de proporcionalidad es universal y se denomina «constante de Planck», que ya había surgido en el análisis realizado en el fenómeno de interacción

entre «materia y radiación». La explicación encontrada para justificar este fenómeno se basó en introducir una suposición: la luz tiene una estructura discreta («fotones»).

Diagrama de franjas de interferencia:



Pantalla receptora



Pantalla con dos rendijas estrechas A y B

○ Fuente emisora de fotones F
Fig.1

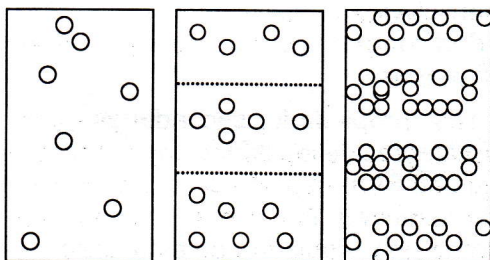


Fig. 2.a

Fig. 2.b

Fig. 2.c

El dispositivo usual del experimento de Young (fig.1) realizado con una fuente F que emite «pocos fotones por segundo. En un intervalo de tiempo breve, los impactos en la pantalla receptora se distribuyen sin ajustarse a un patrón definido (fig.2.a). Si se aumenta el intervalo de exposición, los impactos se acrecientan y comienza un proceso de formación progresiva de franjas (figuras 2.b y 2.c).

¹⁹ Por generalización del lenguaje, algunos autores, mencionan como «observables» a los llamados «valores propios» de los operadores, que se obtienen mediante reglas algebraicas concretas.

²⁰ El fenómeno es particularmente interesante. La energía de los electrones emitidos, no depende de la intensidad de la luz excitadora, sino de la frecuencia de ésta. En cambio, el *flujo de electrones emitidos*, se acrecienta con la intensidad de la luz.

Con ello, se planteó un problema: la luz admite dos naturalezas que se manifiestan, aparentemente, en fenómenos diferentes **según el experimento que realicemos**. En algunos fenómenos, la luz se manifiesta como «una onda»; en otros como una partícula («fotón»). Si realizamos un «experimento de difracción o interferencia», la luz «se comporta como onda»; si examinamos un fenómeno como el efecto fotoeléctrico, «se comporta como partícula». **En este sentido**, la operación de medida que realizamos «crea la realidad».

Podemos preguntar: ¿es posible reconciliar estas dos representaciones de la luz? Si consideramos el fenómeno de interferencia por dos rendijas cercanas (experimento de Young), sabemos que en la pantalla receptora aparecen franjas alternativamente claras y oscuras. ¿No podrían los fotones disponer de una propiedad tal que cuando fluyen en conjunto puedan colisionar entre sí (una interacción entre fotones), de manera que el llamado «comportamiento ondulatorio» no fuera más que una ilusión y solamente existieran franjas? Aceptar este comportamiento, implicaría aceptar que como resultado de esas colisiones, «muchos fotones fueran a las franjas claras» y «pocos fotones a las franjas oscuras». La interacción sería en este caso, la responsable de la redistribución de fotones en la pantalla.

Esta conjetura, aunque podamos considerarla rebuscada, explicaría lo observado en la interferencia. ¿Estamos ante una conjetura sustentable? El mismo argumento debería valer si consideramos la realización del experimento con luz de **intensidad extremadamente débil**. En este caso, podemos pensar en un experimento de «un fotón por vez» en el espacio entre las rendijas y la pantalla. En ese caso, la supuesta interacción in-

terna de fotones conjeturada anteriormente, no podría tener lugar y deberíamos esperar, que las franjas desaparecieran.

En este caso, el experimento revelaría en un comienzo una distribución de impactos en la pantalla, que **no** seguirían un patrón definido. Si consideramos la exposición durante un tiempo **más prolongado**, los impactos comienzan a **construir** las franjas y reaparece el conocido diagrama de interferencia que generalmente atribuimos al comportamiento ondulatorio de la luz.

Los impactos indican la naturaleza corpuscular de la luz; la distribución en franjas el comportamiento ondulatorio. En consecuencia, estamos forzados a asumir que la conjetura de interacción interna entre fotones, **no** es admisible.

Si las figuras de interferencia formadas no son consecuencia de interacciones internas entre los fotones, ¿no ocurrirá que los fotones al llegar a las rendijas se dividan de manera que «un trozo pase por A y otro por B»?

Una posible verificación de esta nueva conjetura sería colocar **muy cerca de las rendijas** (en el espacio entre éstas y la pantalla receptora) de sendos detectores, «1» y «2», de manera que los mismos con un «click» revelen cuando un fotón pasa por A o por B. Si el fotón se dividiera, deberíamos comprobar que existen respuestas simultáneas de los detectores. **Esto no ocurre**. Cada detector indica la presencia de un «fotón completo y no de una fracción del mismo». Cuando el detector «1» emite un «click», el «2» no emite respuesta y viceversa. En consecuencia: **no** podemos sostener la conjetura del «fraccionamiento de los fotones».

Si deseamos describir que un fotón impacta en un punto P de la pantalla

y puede haber pasado por A o por B, la función de onda de este comportamiento se expresa a partir de dos estados fundamentales. Aclaremos este punto. El fenómeno físico «salir de la rendija A y llegar a la pantalla en un punto P (genérico)» se asocia con una función de onda $\Psi_{AP}(x)$. Análogamente, «salir de B y llegar a la pantalla en el punto P», se describe mediante una función de onda $\Psi_{BP}(x)$. ¿Cómo describimos que el impacto en P se puede producir por un camino o por otro?

El «**principio de superposición**» al cual nos referimos anteriormente, nos permite establecer que el comportamiento conjunto del **sistema** que proviene de la izquierda de las rendijas y llega a P (y que aclara que los miembros del sistema pueden pasar por A y por B) se escribe²¹:

$$\Psi_{\text{sistema en la pantalla}}(x) = \alpha \cdot \Psi_{AP}(x) + \beta \cdot \Psi_{BP}(x)$$

(α , β dos complejos que garantizan la normalización de la función del sistema).

El fenómeno «impacto en P», es la confluencia inseparable de «algo que ocurre en A y algo que ocurre en B».

¿Qué ocurre si cerramos una de las rendijas? Se comprueba que desaparece el diagrama de interferencia y se presenta un diagrama típico de *difracción*, que se ajusta en forma precisa al «carácter ondulatorio» de la luz. Podemos saber por donde pasa un fotón ubicando un solo detector que oscile entre A y B, pero en este caso, el diagrama de interferencia se cancela. En realidad, si el detector hace un click, es porque el mecanismo capturó a ese fotón o lo dispersó sin que tengamos forma de saber hacia donde fue. Los fotones que llegan a la pantalla, en este caso, serán precisamente los que *evadieron* al detector. Las conclusiones de

este largo proceso, parecen ser las que siguen:

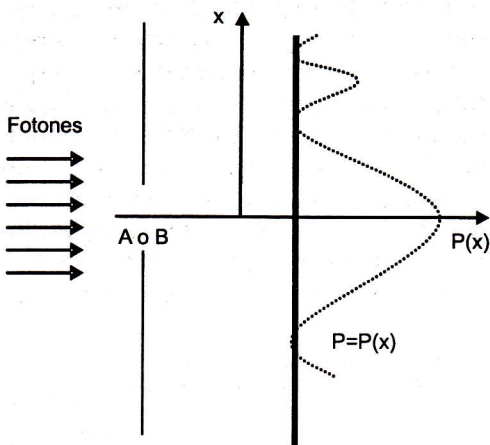


Figura 3. Cuando cerramos una sola de las rendijas (A o B), el diagrama de interferencia se cancela y la luz se ajusta a la forma ortodoxa de la difracción de ondas. Si elegimos un sistema coordinado como se indica, es posible interpretar el diagrama obtenido, como una distribución de probabilidad de impacto mediante una función $P(x)$, para cada fotón que pase por la rendija. No sabemos, donde se producirá el impacto, y el valor de la probabilidad, no significa que el fotón que pase por la rendija esté allí colisionando. La función nos informa acerca de la probabilidad que podemos esperar para que el impacto se produzca en ese punto de abscisa «x». Esto que analizamos con fotones, se produce de la misma forma con electrones, neutrones, protones, ...que no son otra cosa que nombres que atribuimos a familias de «entidades cuánticas» que disponen de fenomenología similar.

- a. Cuando la luz pasa **por una sola rendija** (A o B), o perturbamos al sistema de manera que averiguamos por cuál rendija pasa el fotón, el diagrama de interferencia se cancela y tenemos un esquema de difracción a la «usanza ondulatoria»;

²¹ El «principio de superposición de estados cuánticos» es el origen de la famosa «paradoja del gato de Schrödinger», que el lector puede encontrar con detalle en [«El Enigma Cuántico» -M.R.Guerra- VGrupomagro editorial, (2010)], de reciente aparición. Un análisis más detallado, se puede encontrar en «Introducción a la Mecánica Cuántica» -M.R.Guerra- [Editado por «Librería Reanrt»].

- b. La aparición del diagrama de interferencia, se logra si disponemos de las dos rendijas abiertas, ignoramos por cual de las rendijas pasa cada fotón y este diagrama se confecciona a partir de impactos individuales en la pantalla receptora.
- c. Cuando se clausura una de las rendijas, la luz se ajusta a un comportamiento ondulatorio y presenta un diagrama de difracción.
- d. La luz se presenta como una onda cuando el aparato es adecuado para que se revele *ese carácter*; la luz se presenta como partícula, cuando el aparato es adecuado para que revele *ese carácter*. No hay forma de diseñar un experimento donde se revelen las dos «naturalezas simultáneamente».

La existencia de aspectos corpusculares y ondulatorios en los fenómenos que cumple la luz, de acuerdo con el experimento que se plantea, es lo que generalmente se designa como «dualidad onda- corpúsculo» y se inscribe en un principio de mayor generalidad denominado «**principio de complementariedad**».

La palabra complementariedad, hace referencia a que las descripciones de la luz como «corpúsculo puro» o como «onda pura», **no** son suficientes para entender la física del fenómeno.

Lo que hemos descrito con fotones, se puede extender a «electrones», «protones», «neutrones»..., es decir a familias de «entidades cuánticas» que disponen de propiedades físicas similares e indistinguibles²².

La función de onda asociada al sistema, definida sobre otra pantalla receptora, permite confeccionar una distribución de «probabilidad de impacto» que determina la posible colisión en un punto determinado de esta última pantalla²³.

Una consecuencia de la complementariedad onda-corpúsculo, es uno de los aspectos más relevantes de la Mecánica Cuántica y que la distinguen nítidamente de toda otra teoría: el llamado «**principio de incertidumbre**». Este principio, se traduce en determinadas desigualdades entre observables complementarios. Se trata de un punto delicado de la teoría, que no podemos examinar con absoluta precisión y rigurosidad en este escrito, sin apelar a un formalismo adecuado. No obstante, es posible indicar algunos aspectos de importancia.

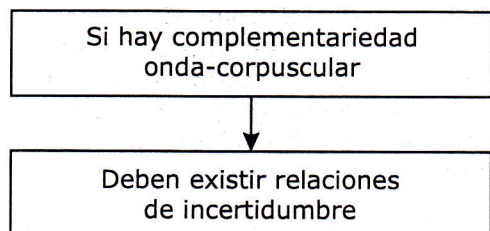
La dualidad o complementariedad «onda-corpúsculo», establece un límite sobre la cantidad de información que podemos obtener de un sistema cuántico en una operación simultánea. En realidad, podemos elegir o medir las propiedades *ondulatorias* de la luz, si permitimos que los fotones pasen a través de un par de rendijas, **ignorando** por cuál de ellas pasan los fotones. También podemos **observar** los fotones cuando pasan por las rendijas, *sacrificando en este caso*, toda interferencia. Lo que **no es posible** es realizar las dos cosas al mismo tiempo (simultáneamente).

El contenido de esta imposibilidad, Werner Heisenberg lo expresó en sus relaciones de incertidumbre, al com-

²² Las palabras «electrón», «fotón»,..., son denominaciones que se asignan a un conjunto de propiedades características que se asocian a una familia de entidades cuánticas pertenecientes a una misma familia. De esta manera, «un electrón» es un miembro de una clase de entidades que se comportan sometidos a condiciones físicas similares de la misma manera.

²³ Para que la función de onda se asocie a una distribución de probabilidad, debemos establecer una restricción algebraica (suponiendo que el intervalo donde la función se halle definida es el eje Ox): $\int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi(x)|^2 dx = 1$. Si se considera que en cada abscisa existe una **densidad de probabilidad** $|\Psi(x)|^2$ determinada de encontrar a la partícula cuántica en esa posición, podemos *interpretar* este resultado afirmando que la misma *puede* estar «en varios lugares a la vez».

prender que la determinación de la rendija por la cual pasa un fotón, es en esencia, *una determinación de posición*, mientras que la observación del diagrama de interferencia es *una determinación del ensanchamiento del diagrama gobernado por la distribución de velocidades y de momentum lineal*.



La conclusión de Heisenberg es que no es posible establecer el conocimiento simultáneo de estos observables.

La existencia de la incertidumbre, se puede visualizar en forma más simple que en el caso de las dos rendijas, cuando la luz pasa *por una sola rendija* definiendo un diagrama de difracción. Es sabido, que la dispersión angular del diagrama (es decir su ensanchamiento o angostamiento) depende en forma inversamente proporcional al ancho de la rendija. En este caso, si procedemos con luz extremadamente débil, obtenemos como en el caso de dos rendijas, una serie de colisiones distribuidas por azar en la pantalla. Si prolongamos la exposición, se comienza a construir progresivamente el diagrama de difracción a medida que el número de fotones se incrementa. Si el ancho de la rendija define un criterio para determinar la posición de un fotón que la atraviesa, cuando esto ocurre, el impacto en la pantalla receptora se produce en «algún lugar» (con cierta probabilidad para los distintos lugares), sin que podamos predecir **dónde ocurrirá la colisión**. En consecuencia,

tenemos precisión en la localización espacial del fotón en la dirección de la rendija, pero tenemos a la vez un alto grado de imprecisión en el tamaño de la componente del momentum en esa misma dirección.

La complementariedad, menciona palabras tales como «onda» y «partícula», que tiene un significado preciso en el marco clásico. Utilizamos un *lenguaje clásico para exponer ideas que no son clásicas*. Bohr afirmó siempre que no podemos escapar a esta «paradoja verbal», porque el lenguaje clásico es la única estructura que se adecua a nuestra cognición.

La idea de dualidad o complementariedad «onda/corpúsculo», introduce una **discontinuidad** en la naturaleza. Bohr comenzó por considerar que la complementariedad ya tenía «visos de realidad en el propio contexto de la Física Clásica: la dualidad «cinemática/dinámica» es una complementariedad vigente, clásica e indispensable para la completitud de la descripción. Sin embargo, la idea de «complementariedad» tiene un significado más general y profundo: describe cómo relacionar nuestros conceptos y experiencias físicas al describir la física de la naturaleza. En esencia es un concepto *plenamente cuántico*.

Para Bohr, la «complementariedad no describe un «par de puntos de vista o aspectos de la naturaleza». Cuando se presenta la complementariedad como «*puntos de vista* de una misma cosa» tenemos lo que generalmente se denomina «complementariedad débil». Para Bohr, la complementariedad **no tiene ese carácter** ya que supone una «complementariedad fuerte», que menciona aspectos **irreductibles** y en cierto sentido contrarios»²⁴ de

²⁴ J.R.Honner. «The description of nature» [Studies in History and Philosophy of Science, 13, (1982)].

la propia estructura de la naturaleza. Finalmente: la complementariedad, no es un concepto «dialéctico». Aquí no hay ni «tesis» ni «antítesis» ni «síntesis». Son aspectos separados irreductibles e incompletos al considerarse por separado.

3. Separabilidad

Mención a la paradoja EPR

El concepto de *separabilidad de un sistema en partes*, es esencial en la Física pre- cuántica²⁵. Se supone que si un sistema se fractura en dos partes (A y B) y las mismas se separan, es posible estudiar las partes A y B por separado. Si elegimos la parte A para examinar, es necesario suponer que la parte suprimida B, se puede sustituir por acciones determinadas (por ejemplo: «fuerzas» y «torques»), que implican la existencia de señales provenientes de B que operan sobre A. Asimismo, si provocamos una modificación en la parte A, el trozo B, debe «enterarse» de esa modificación si la misma afecta a un principio de conservación. Para ello, debe mediar un intervalo de tiempo finito, necesario para que la «información del cambio» parta de A y llegue a B. Esta concepción se denomina generalmente como «**principio de localidad**» y es una de las piedras angulares de la Relatividad einsteniana.

Cuando las partes A y B, se hallan en las «cercanías», este problema se presenta como intuitivo y posible. Sin embargo esto *no* es así en general y la Mecánica Cuántica revela que esta «separabilidad observada en los fenómenos macroscópicos» no es universalmente válida en un contexto más profundo de análisis. Hay sistemas que cuánticamente *no* son separables. Este excepcional comportamiento, se denomina «**entrelazamiento cuántico**» y se halla avalado en numerosos experimentos de gran precisión y al mismo tiempo

constituye un aspecto revolucionario de la actual teoría informática²⁶.

Cuando se realiza *una medida* sobre un sistema, la teoría cuántica establece que la función de onda asociada al **conjunto** (*sistema + instrumento de medida + observador*), a partir de su comportamiento probabilístico, selecciona alguno de los valores probables (el más probable si el espectro de elecciones es discreto). Este comportamiento de la función de estado, se denomina «**colapso** de la función de onda»²⁷. En ese caso, los restantes valores posibles de adoptar se suprimen en el colapso anterior.

En cualquier caso, la idea central consiste en suponer que la «operación de medida» es consecuencia de una *interacción compleja donde interviene el sistema como una de las partes*. Si *no* hay interacción, *no* hay medida.

Históricamente, el análisis del problema de la separabilidad de un sistema se asocia a una paradoja famosa, que plantearan Albert Einstein, Boris Podolsky y Nathan Rosen (conocida como «paradoja EPR») en abril del año 1935.

En ese año, y con el manifiesto deseo de asestar un «golpe mortal» a las interpretaciones probabilistas da-

²⁵ El lector interesado en los aspectos formales y ampliatorios de lo que sigue, puede consultar alguna de las obras que siguen:

- a) «Mécanique Quantique»- Jean Louis Basdevant/George Dalibard (Ed. L'école polytechnique);
- b) «Las carencias de la realidad»- Ramón Lapiedra (Ed. Tusquets);
- c) «Más allá de la teoría cuántica»- Michael Talbot (Ed. Gedisa)
- d) «Introducción a la Mecánica Cuántica». Mario R. Guerra (Editado por Librería Renart UCUDAL)

²⁶ Intentaremos describir este punto *sin* utilizar formalismo. En este intento, perderemos precisión, aunque la idea central es dejar un concepto «aproximadamente genuino» de este importante fenómeno cuántico que no tiene paralelo en el campo de la Física Clásica.

²⁷ Esta postura es una posible, pero no es la única. En la teoría cuántica de los «muchos mundos», la función de onda no colapsa.

das por los integrantes de la Escuela de Copenhague, y que Einstein reconocía como «epistemológicamente erróneas» y filosóficamente inadecuadas, se conoce de estos físicos un breve artículo titulado «Can Quantum Mechanical Description of Physical Reality Be Complete?»²⁸

Aunque no vamos a examinar en detalle el argumento, podemos plantear las conclusiones de mayor relevancia.

Los autores de la «paradoja EPR», parten de una creencia: «una teoría es **buena** si tiene en su estructura conceptos que se reflejan en la **realidad**». Y este es el problema, puesto que las relaciones de indeterminación de Heisenberg, establecen que si la posición de una masa puntual se halla determinada con precisión, el momentum, *carece de realidad*. La diferencia con el planteo clásico es notoria.

Dado que en este contexto, **no** existen «relaciones de incertidumbre», **todos** los observables que introduce la teoría, *reflejan aspectos de la realidad*, que son medibles por procedimiento concretos, independientemente de que midamos con simultaneidad o no. Veamos el contenido del argumento de la paradoja EPR.

Supongamos en primer lugar un sistema formado por dos átomos y que en este sistema se experimenta una transición desde un *estado excitado* al *estado fundamental*, con la emisión de *dos fotones* en una sucesión muy rápida. Supongamos que los fotones son de diferente «color» (uno «rojo» y otro «violeta»), lo que significa que se asocian a longitudes de onda diferentes. Imaginemos que es-

tos fotones tiene una propiedad muy particular: sus polarizaciones se hallan **siempre ortogonales**. Esto significa que si el espín del fotón A se ubica en la dirección Oz, el espín del fotón B se ubica en la dirección del eje Ox. El que esto pueda ocurrir es un fenómeno aleatorio y experimentalmente comprobable. No obstante, podemos preguntar: ¿cómo obtenemos fotones que tengan siempre polarizaciones ortogonales?

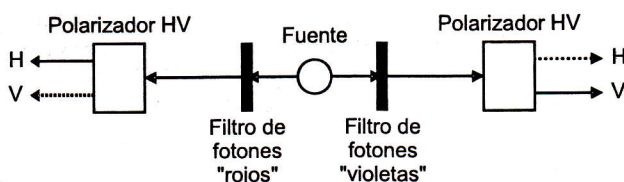


Figura 4. Una fuente genera dos mezclas de fotones «rojos» y «violetas» que se mueven hacia sendos filtros. Estos filtros, dejan pasar solamente una clase de «fotones coloreados».

Los fotones seleccionados en cada caso, se dirigen hacia sendos polarizadores que emiten solamente fotones con polarizaciones «H» o «V», que pueden reconocerse a la salida de cada canal. En la figura hemos indicado los fotones seleccionados «H» (por ejemplo a la salida izquierda fotones «violetas exclusivamente») y «V» (por ejemplo a la salida derecha fotones «rojos exclusivamente»). A las salidas de los polarizadores, podemos ubicar detectores (no indicados en el esquema) que operen con luz suficientemente baja y los detectores operen en forma suficientemente rápida para que sea posible detectar fotones individuales.

Un dispositivo posible que permite responder a esta pregunta es el que sigue: una fuente de un gas de átomos excitados, emite fotones «rojos» y «violetas», los cuales se dirigen sin distinción hacia dos filtros ubicados a izquierda y derecha. Uno de estos filtros solamente permite pasar fotones

²⁸ La lectura de este famoso artículo [aparecido en el Physical Review, Volumen 47, (1935), pág. 777- 780], aunque breve, no es sencilla. Se trata, esencialmente, de una disertación físico- filosófica. El nudo del planteamiento se refiere a la relación que debe existir entre una «buena (o completa)» teoría y la «realidad». De hecho, una «buena teoría» es aquella que refleja o presenta una **contrapartida** de los «elementos de realidad». Einstein entendía que en este aspecto, la Mecánica Cuántica no respeta este «axioma operacional».

«rojos»; el otro solamente fotones «violetas».

Una vez seleccionados, los fotones se envían a sendos polarizadores que disponen de dos canales, de manera que los que salen por el canal «H» salen con polarización «horizontal» y los que salen por el canal «V», lo hacen con polarización «vertical».

Seleccionamos de este modo, fotones con colores diferentes y polarizaciones ortogonales (por ejemplo «V» a la salida derecha y «H» a la salida izquierda), como exigimos al comienzo. Cada vez que encontramos un fotón con polarización «H» a la salida del polarizador izquierdo, comprobamos que por el derecho emerge otro fotón con polarización «V». Esto nos dice que sabemos lo que ocurre a la salida del polarizador derecho, sin que midamos en dicho fotón. Es decir, *sin que sea necesario en este caso, que la función de onda colapse* para informarnos acerca de lo que ocurre en esa salida. Esto significa que *colapsando la función de onda en el fotón izquierdo, podemos conocer lo que ocurre con el fotón derecho, sin que este conocimiento implique ningún colapso de la función de onda de ese fotón derecho*.

Si estuviéramos en un contexto clásico, lo anterior no introduce **ningún** aspecto observable. Pero cuánticamente, hay una dificultad.

Esto ocurre, porque una medida sobre cualquier parte del sistema, afecta al sistema que se mide. Antes de medir, ignoramos cual es la polarización del fotón que emerge del canal izquierdo (**hay que medir**, para comprobar que se encuentra en la condición esperada) y es altamente probable que su polarización no sea puramente «H». La modificación que introduce el polarizador de la izquierda en el fotón izquierdo, es evidente que

no puede modificar instantáneamente (esta es la clave del asunto) al fotón de la derecha, puesto que cualquier cambio implica que viaje información de un detector al otro con velocidad acotada, como impone la Relatividad.

En este lugar, podríamos realizar algunas conjeturas. Como no hemos medido en el fotón derecho, podríamos suponer que independientemente de la forma en que operen los polarizadores, *en cualquier circunstancia los fotones emitidos salen con polarizaciones ortogonales*. ¿Es razonable esta conjetura?

Si independientemente de que midamos la situación del fotón derecho, conocemos su estado de polarización, entramos directamente en colisión con un principio fundamental de la Mecánica Cuántica que establece que el conocimiento cuantitativo de los diferentes aspectos de un sistema es consecuencia de una operación de medida y el resultado *no está afectado de incerteza alguna*. *No hay en juego en este caso, «probabilidad de respuesta» y en consecuencia no existe «indeterminación alguna en el resultado»*.

De otro modo: en caso que la conjetura fuera correcta, el dispositivo polarizador de la izquierda, permitiría obtener información equivalente a una medida, sin perturbar al subsistema que se mide. Esto es contradictorio con la base de la teoría.

Estas consideraciones indican que la conjetura realizada, no podemos mantenerla, a menos que retornemos a un cuadro *determinista*, como el que propone la «teoría de las variables ocultas», donde la existencia de éstas, describe un nivel profundo donde la naturaleza es determinista, mientras que la teoría cuántica describiría una «superficie aparentemente

te regulada por el azar». Todo ocurre, como si las condiciones del fotón derecho, estuvieran predeterminadas por las condiciones del fotón izquierdo.

Este planteo tiene, además de lo señalado anteriormente, **otros** diversos inconvenientes que no podemos describir detalladamente en este lugar, por lo cual remitimos al lector a la bibliografía recomendada.

La pregunta sigue vigente: ¿es posible que exista algún tipo de correlación entre los fotones, que no implique transmisión de información con la velocidad límite que impone la Relatividad? ¿Es posible que existan circunstancias tales donde se viole el «principio de localidad»?

La dilucidación de esas preguntas cruciales, que separan abruptamente la descripción que realiza la Mecánica Cuántica de las descripciones clásicas, se hallan contenidas en las conclusiones obtenidas por el físico irlandés John S. Bell, en un famosísimo teorema que demostrara en 1964 y que constituye una de las conclusiones mayores del pensamiento físico.

Las conclusiones de Bell son extraordinariamente importantes, porque si bien se trata de una demostración lógica, es posible realizar *experimentos que avalen las conclusiones del mismo*. Realizados estos experimentos, con entidades cuánticas diversas, se confirmaron las conclusiones (es decir: es posible violentar el principio de localidad en determinadas circunstancias en algunos sistemas cuánticos, aunque la mayoría de los sistemas que se hallan en nuestro conocimiento más próximo, se ajusten a dicho principio) en forma extremadamente precisa. Tal vez, el experimento más conocido sea el realizado con excepcionales precauciones experimentales, por los físicos franceses Alan Aspect y Jean Dalibard en 1984²⁹.

Sin entrar en mayores detalles, Bell establece un sistema de desigualdades, que **si son violadas**, el sistema **no cumple con el principio de localidad**.

La prueba realizada por Bell podemos interpretarla, de manera tal que si la Mecánica Cuántica *es correcta*, es necesario adoptar una de estas opciones:

- El mundo *no* es objetivo y en consecuencia no existe en un «estado definido»;
- El mundo no se ajusta al «principio de localidad» en forma universal como preconiza la Relatividad y *permite la existencia de «correlaciones» instantáneas a distancia sin que ello implique transferencia de información*. Este importante fenómeno, *estrictamente cuántico y sin paralelo posible en el contexto clásico, se denomina «entrelazamiento o enredo cuántico»*³⁰.

²⁹ En la bibliografía mencionamos nuestro libro «El Enigma Cuántico» -Mario R. Guerra- [Ed. VGrupomagro, (2010)], actualmente en el mercado. En esta publicación se amplían algunos aspectos del contenido del «teorema de Bell» y se listan los numerosos experimentos realizados para demostrar experimentalmente sus conclusiones a lo largo de casi 40 años. Independientemente, el lector puede consultar «Introducción a la Mecánica Cuántica» -M.R. Guerra- [Ed. Librería Renart], donde el análisis del teorema se plantea con mayor detalle.

³⁰ Hay fenómenos cuánticos más conocidos y que no tienen paralelo clásico. Uno de ellos es el conocido «efecto túnel», de acuerdo con el cual, una «partícula cuántica», logra atravesar un muro de potencial que clásicamente no podría atravesar. Clásicamente la situación es así: si una masa puntual «m» se mueve con velocidad «v» (imaginemos que lo hace con velocidad constante, sobre un apoyo horizontal de muy baja fricción), la *altura máxima* que puede «remontrar» si se presenta una «colina del terreno», es $h = v^2/2g$. Si la velocidad «v» es mayor, la partícula sube la colina y puede «traspasar hacia la otra ladera». En caso contrario, si la velocidad es inferior, la altura «h», no podrá alcanzarse. En el caso cuántico, la situación es completamente diferente y la incidencia de una «partícula cuántica» sobre un muro de potencial más alto que la energía que transporta la partícula, revela que existe una probabilidad de

Para Einstein y la Física pre-cuántica, **todos** los sistemas cumplen las desigualdades **sin** violentarlas en ninguna circunstancia, con lo cual admiten la validez sin excepción del «principio de localidad», negando en consecuencia la opción b), indicada anteriormente.

Cuando Einstein, Podolsky y Rosen plantearon el argumento EPR, Bohr consideró la necesidad de analizarlo y responderlo.

Lo hizo en junio de ese mismo año 1935, argumentando que el planteo de Einstein- Podolsky- Rosen, adolecía de un **defecto esencial**: no reconocer que la llamada «realidad cuántica» es una «borrosa situación» en la cual el observador rescata, cuando mide efectivamente, y no antes, alguna respuesta con cierta probabilidad.

Suponer que *antes de medir hay algo denominado espín (en nuestro caso «polarización») en uno de los electrones (en nuestro caso operamos con fotones, pero esto no es relevante), es suponer que se ha suprimido la «borrosidad probabilística», y ello conduce a que la paradoja parezca tener asidero.*

La intervención del observador es esencial, para que la «propiedad» adquiera significado (aquí reaparece el concepto de «creación de la realidad»). La conclusión de Bohr consiste en afirmar que la incertidumbre que gobierna la medida realizada sobre A, **no** permite determinar *qué cosa ha ocurrido con el sistema en conjunto.*

Einstein, Podolsky y Rosen, previeron el contenido de la respuesta de Bohr. Consideraron que si a éste le asistía razón y la «realidad cuántica» era en definitiva una «irreducible nube de probabilidades» y quedaba **sin sentido** hablar de la existencia de una magnitud antes de medirla, se

presentaba otro problema: si los dos fotones se hallan muy alejados y la polarización de A no tiene «realidad física» hasta ese momento, de *alguna manera, al medir, es necesario que B determine su propia polarización en forma instantánea y por ello, comunicando información con velocidad infinita.*

Para la Relatividad, esta situación es inaceptable³¹. Más aún, de verificarse esa situación, Einstein, Podolsky y Rosen sostuvieron en su momento que se entraría en colisión con «cualquier definición razonable de realidad».

Si la teoría cuántica resultara incompatible con la realidad, es necesariamente **incompleta**. Esta es en esencia, la conclusión a la que llegaron, los creadores de la paradoja EPR.

Lecturas recomendadas

A. Generales (sin o escaso formalismo matemático)

Las lecturas que siguen, son solamente algunas posibles dentro de una enorme variedad existentes.

1. **«El Cántico de la Cuántica».**
Ortoli / Pharabod. [Ed. Gedisa]
2. **«Las carencias de la realidad».**
R. Lapiedra. [Ed. Tusquets]

reflexión y una probabilidad no nula de encontrar a la partícula en la «zona prohibida». Los llamados «diodos túnel» o «diodos Esaki» se basan en esta propiedad estrictamente cuántica. Asimismo, debemos señalar que Sean Washburn y Richard Webb, del Centro de Investigaciones Watson (IBM) han revelado pruebas que demuestran que el «efecto túnel» se cumple también a escala *macroscópica*. Para esto utilizan un dispositivo denominado SQUID (Superconducting Quantum Interferente Device), donde se verifica la existencia del fenómeno a escala no atómica.

³¹ Recordemos que la Relatividad Especial preconiza la existencia de una «velocidad límite» en la transmisión de información. La coherencia de la teoría con el Electromagnetismo de Maxwell, condujo a elegir esa velocidad coincidente con la de la luz.

3. «**The Quantum World**». J. Polkinghorne. [Ed. Longman]
4. «**Más allá de la teoría cuántica**». Michael Talbot. [Ed. Gedisa]
5. «**El enigma cuántico**». M. R. Guerra. [Ed. Grupomagro] (de reciente aparición)
2. «**Introduction to Quantum Mechanics**». David Griffith. [Ed. Prentice - Hall]
3. «**Mécanique Quantique**». J. Basdevant / G. Dalibard. [Ed. École Polytechnique]
4. «**Quantum Mechanics**». D. Bohm. [Ed. Dover]
5. «**Introducción a la Mecánica Cuántica**». M. R. Guerra. [Librería Renart - Universidad católica del Uruguay]

B.Textos (con formalismo matemático)

1. «**Quantum Physics**». Roger Newton. [Ed. Spriger Verlag]

...

RECOMENDACIÓN WEB 1

WEB

<http://www.physicslab.co.uk>

Este sitio ofrece 28 programas de Física gratis, cuyo nivel corresponde a la Enseñanza Media.

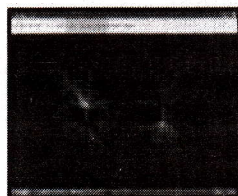
Estos programas son simulaciones de experimentos en los cuales se pueden controlar variables, tomar medidas y encontrar relaciones. Los experimentos se realizan solamente con el ratón.

Si bien los programas están escritos en idioma inglés, su manejo es muy sencillo.

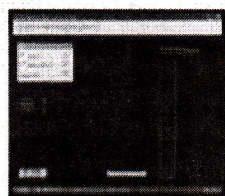
Al ingresar a la página se ven imágenes, como las adjuntas, correspondientes a los diversos programas; al hacer click sobre una imagen se puede bajar el programa correspondiente. También hay una imagen, en el centro, que dice «All programs in one» con la cual se baja un archivo que instala todos los programas más una pantalla inicial desde donde seleccionarlos.

Excelente material para laboratorios con pocos recursos.

PhysicsLab



Magnetic Fields



Resonance

...

BALANZA DE COTTON

Guzmán Trinidad¹, Daniel Bacchino²

¹Profesor de Física en el Liceo de Solymar 1 y de Física Experimental I en el Instituto de Profesores Artigas; e-mail: guzman.trinidad@gmail.com

²Profesor de Física en los Liceos N° 4 y N° 10 de Montevideo y de Física Experimental I en el Instituto de Profesores Artigas; e-mail: dbaccisi@gmail.com

Artículo

Resumen

Se propone una actividad experimental pasible de realizarse en cursos de física de nivel medio, especialmente en el curso de tercero año de bachillerato. La actividad permite verificar relaciones entre cuantías vinculadas a la fuerza de origen magnético que experimenta una corriente eléctrica¹. Si bien existen diseños relativamente sofisticados² del dispositivo, se propone una disposición que se pueda implementar en cualquier instituto del subsistema educativo medio.

Nota Biográfica:



Aimé COTTON (1869-1951)

En la referencia 8 se puede encontrar una breve biografía, en idioma francés.

Introducción

Es usual que se realicen, en los cursos de bachillerato, al menos dos actividades experimentales «clásicas» referidas a la temática planteada.

En una de ellas, de corte cualitativo, se muestra el «efecto mecánico» de una corriente eléctrica al atravesar una «hamaca» que se encuentra en la zona de influencia de un imán.

Otra, que se ha reeditado en algunos institutos a partir de la reformulación 2006, es aquella en que una balanza adecuada se coloca en el interior de un solenoide o bobina y se intenta equilibrar una fuerza sobre uno de los extremos de la balanza con otra de origen magnético que se produce sobre el extremo opuesto ubicado en el interior del solenoide³.

La actividad que se presenta aquí involucra la interacción entre un imán y un conductor por el que circula corriente, en la que se pretende medir fuerzas, longitudes, ángulos, intensidades de corriente, y, de forma indirecta, módulo del vector inducción de campo magnético $\vec{B}$ ⁴. El dispositivo lleva el nombre *balanza de Cotton*⁵.

Un breve punteo teórico

Como se muestra mediante la actividad de corte cualitativo mencionada en la introducción, cuando se ubi-

¹ En algunos textos se llama ley de Laplace.

² Ver las referencias 4, 5, 6, y 7.

³ Ver referencias 9 a 14.

⁴ En adelante lo llamaremos «campo magnético», por sencillez y porque, en el nivel secundario, generalmente es el único vector utilizado para describir a la entidad campo magnético.

⁵ Ver referencia 1. Las referencias 2 y 3 constituyen las fuentes escritas más antiguas a las que accedimos.

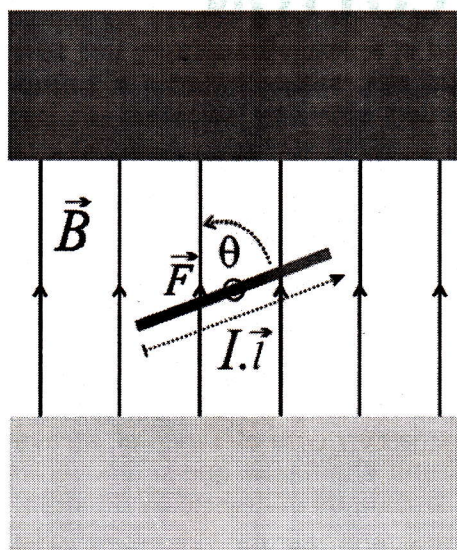


Figura 1. Representación esquemática de la situación.

ca un conductor entre los polos de un imán en U, y se hace circular una corriente eléctrica por él, se observa la existencia de una fuerza.

La bibliografía sostiene que la fuerza magnética sobre un segmento de alambre portador de corriente de intensidad I , inmerso en un campo magnético uniforme $\vec{B}$, puede expresarse así:

$$\vec{F} = I \cdot \vec{l} \wedge \vec{B} \quad (1)$$

Donde $\vec{l}$ es un vector cuyo módulo está definido por la longitud del conductor y su sentido coincide con «el sentido convencional de la corriente».

Para nuestros fines, es útil explicitar todas las eventuales variables que pueden aparecer en la expresión anterior, para lo que escribimos el módulo de la fuerza de modo que aparezca el ángulo θ :

$$F = I \cdot l \cdot B \cdot \sin \theta \quad (2)$$

Con los instrumentos de medida que realizamos el experimento, se pueden medir con relativa sencillez las magnitudes: fuerza (F), intensi-

dad de corriente (I), longitud (l), ángulo (θ).

El módulo del vector $\vec{B}$ lo determinaremos de forma indirecta. Es probable que originalmente la balanza de Cotton haya sido pensada para realizar esa determinación, cuando no existían otras herramientas al efecto.⁶

El experimento

En qué consiste

Cuando se ubica al conductor en la zona donde hay campo apreciable, orientado adecuadamente, y se hace pasar corriente por el mismo, la balanza –que está «pesando» al imán– acusa una lectura diferente a la que se observaba cuando no circulaba esa corriente. Este es el fenómeno de partida que permite asociar una fuerza adicional sobre el conductor cuando circula una corriente por él.

La utilización de una balanza electrónica implica que casi no se modifica la posición relativa del conductor respecto del imán. Esto optimiza la tarea ya que no se necesita usar tiempo en restablecer la ubicación relativa original, cada vez que se realiza una medida.

Asumiremos que la fuerza, de origen magnético, tiene dirección vertical siempre que ubiquemos horizontalmente al trozo efectivo de conductor (la parte corta de la «L» en la figura 2); y que los trozos verticales de conductor que se fijan al soporte, reciben fuerzas magnéticas horizontales de sentidos opuestos, de modo que en una primera aproximación no las consideraremos.

Si bien la propuesta de este trabajo es realizar un análisis cuantitativo de la situación, es posible observar

⁶ Existen, en la actualidad, sensores que pueden determinar, mediante el efecto Hall, campos magnéticos.

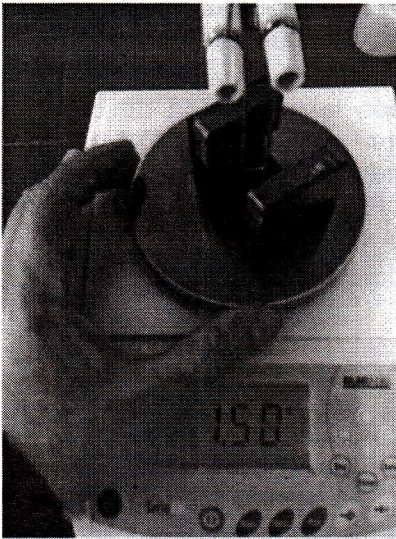


Figura 2. Foto del prototipo experimental.

cualitativamente lo indicado por la balanza cuando se cambia el sentido de la corriente, o la ubicación relativa del imán y el conductor.

Una cuestión previa

En la práctica, lo que necesitamos es definir un «rango aceptable» (acotado por las incertidumbres que se defina admitir) donde ubicar al conductor; especialmente cuando el trabajo experimental requiere moverlo respecto al imán (al variar la longitud, o el ángulo). Parece importante, como tarea previa, «mapear» la zona de trabajo, porque permite acotar una región donde el campo magnético es aceptablemente uniforme⁷. En el apéndice I se muestran los resultados de un mapeo parcial de la zona entre los polos del imán que utilizamos.

El dispositivo experimental

El dispositivo que utilizamos está constituido por los siguientes elementos, algunos de los cuales se muestran en la figura 2:

- Conductor no flexible, solidario a un soporte fijo al piso, con forma «L» en la figura 2.

- Generador de voltaje ajustable CC, capaz de soportar intensidades de corriente relativamente altas, no visible.⁸
- Balanza electrónica, con una resolución del orden de la centésima de gramo.
- Imán permanente en forma de U, apoyado sobre el plato de la balanza.
- Amperímetro, no visible.
- Conectores eléctricos.

Por datos adicionales sobre los componentes del dispositivo ver el cuadro Ficha Técnica.

La base del análisis

Una técnica conocida⁹ para analizar relaciones entre magnitudes, guiados por la ecuación (2), requiere que tomemos dos cuantías por vez para verificar su vinculación, cuidando que las otras queden fijas.

De esta forma planteamos la tarea. Tomamos como variables independientes a la intensidad, la longitud y el ángulo en sendos experimentos, y a la fuerza como variable dependiente.

El planteo que realizamos asume que es posible lograr, mediante un imán permanente, una zona donde el campo magnético sea uniforme.

⁷ Lamentablemente no disponemos de un sensor de campo magnético de dimensiones adecuadas para realizar el «mapeo» referido. Lo realizamos moviendo un conductor en la región relevante, con corriente fija, procurando no cambiar su orientación respecto a las hipotéticas líneas de campo magnético y observando la lectura de la balanza.

⁸ Cuando realizamos medidas con intensidad de corriente fija, el valor de la misma ronda los 4 A. Observamos que para tener una lectura estable en el amperímetro se requería esperar un tiempo prudencial. Esto, posiblemente, debido a que la fuente estaba trabajando en la cercanía de la intensidad máxima para la que fue diseñada.

⁹ La llamamos usualmente «control de variables».

Fuerza contra intensidad de corriente

Los datos que se muestran en el gráfico¹⁰ de la figura 3 fueron tomados con un conductor de «longitud efectiva» $L = (2,70 \pm 0,05)$ cm, ubicándolo en la zona en donde previamente observamos el campo más intenso, de forma que quedara orientado perpendicularmente a las líneas de campo.

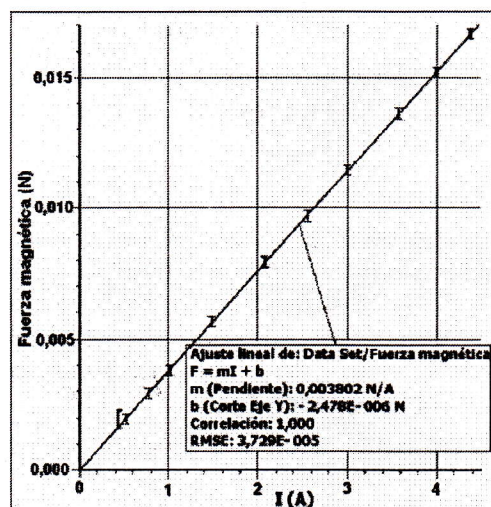


Figura 3. Fuerza magnética contra intensidad de corriente.

Se ha trazado un ajuste lineal al conjunto de datos experimentales. Viendo los valores del coeficiente de correlación y del error cuadrático medio (RMSE), la decisión parece acertada.

El coeficiente b se puede considerar nulo.

Las dos afirmaciones anteriores permiten decir que existe una proporcionalidad directa entre el módulo de la fuerza magnética y la intensidad de corriente.

El valor del coeficiente m de la recta permitirá calcular el módulo de $\vec{B}$.

Fuerza para diversas longitudes del conductor

Estos datos fueron obtenidos ajustando la intensidad de corriente al valor $I = (4,00 \pm 0,01)$ A, ubicando al conductor en un lugar cercano al del experimento anterior, y con orientación similar.

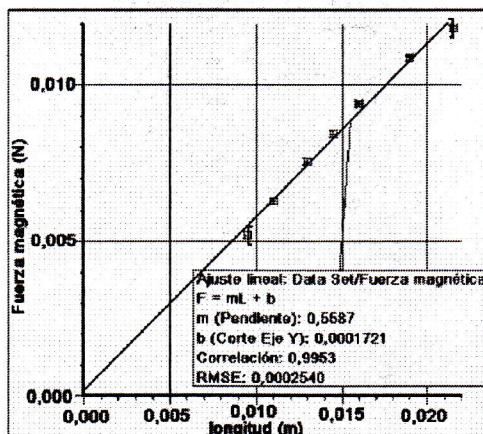


Figura 4. Cambiando la longitud del conductor.

Un cuidado a tener presente es ubicar al conductor en la misma zona, luego de cambiar su longitud. Recordamos que hay pequeñas variaciones del módulo del campo en la misma.

Definimos un ajuste lineal para estos datos. Nos encontramos con que los indicadores de «buena linealidad» (los últimos dos del recuadro de la figura 4) son aceptables. Una observación más detallada quizás amerite buscar y justificar un ajuste más fino. Dado que la ordenada en el origen puede considerarse nula, podemos afirmar que también existe una proporcionalidad directa entre F y l .

La pendiente « m » nos permitiría también determinar el módulo de $\vec{B}$.

¹⁰ Todos los gráficos que se presentan fueron elaborados utilizando el software: Logger Pro 3.4.2. ISBN 1-929075-24-3, 2006, Vernier Software & Technology.

Cambiando la orientación del conductor respecto al campo

En esta parte del trabajo hemos utilizado un conductor de longitud efectiva $L = (1,40 \pm 0,05)$ cm, por el que circula una intensidad de corriente $I = (4,24 \pm 0,01)$ A.

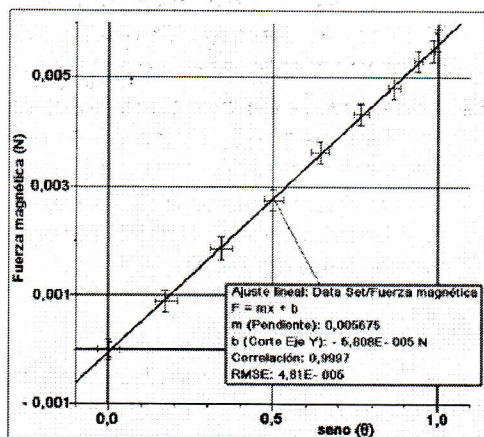


Figura 5. Fuerza magnética en función del seno del ángulo.

Definimos trabajar en una zona donde el centro del conductor se ubicara cerca del valor mínimo del campo. Ver el Apéndice I.

El ángulo cero lo definimos a partir de encontrar la fuerza nula, de modo que el valor de la ordenada «b» parte de una definición operacional.

La decisión del ajuste lineal entre F y $\sin(\theta)$ parece aceptable según los indicadores mencionados, como muestran los resultados del cuadro interior en la figura 5. Los parámetros pasibles de compararse con los gráficos anteriores indican una calidad similar en la proporcionalidad encontrada, en oposición con una posible postura previa sobre la mayor dificultad en verificar esta relación.

Comentarios finales

Los resultados indican que esta actividad experimental se puede realizar en un curso de nivel secundario

donde se trate la temática, ya que las relaciones de proporcionalidad directa que se plantee verificar, pueden concretarse con suficiente precisión para ese nivel.

Si se determinan los módulos de los vectores para los dos primeros casos estudiados, observamos que los resultados son similares, ya que se ha trabajado en la misma zona.

No es imprescindible disponer de los componentes descritos en la ficha técnica, aunque sí es importante que algunos tengan las características técnicas referidas (balanza electrónica y fuente CC).

Ficha técnica

Los datos técnicos de los componentes del dispositivo utilizado son los siguientes.

Fuente alimentación. PROMAX. DC POWER SUPPLY FAC-364 C. 220 V & 125 W.

Balanza. BLAUSCAL AH-600 (600g, 0,01g). Esta balanza la suministraba el departamento de proveeduría del CES, hasta hace unos meses.

Amperímetro. Multímetro FLUKE 87, TRUE RMS MULTIMETER, para la función mA/A DC.

Imán. Se ha construido con una U de hierro dulce y dos imanes para utilizar en peceras. En el Apéndice II se muestran imágenes y recomendaciones para su construcción.

Conductor. Alambre de cobre de $\phi = 1$ mm.

Referencias

1. Halliday, D., Resnick, R., «Física» Tomo 2, fig. 33-7, pág. 178, Ed. CECSA, México, 1984.

Balanza de Cotton

2. Simon, G. & Dognon, A., PHYSIQUE, pág. 587, Ed. Masson et Cie, Paris, 1947.

3. Peruca, Eligio, FÍSICA GENERAL Y EXPERIMENTAL, TOMO II ÓPTICA ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO, Ed. Labor, Barcelona, 1944.
4. Leybold Didactic GMBH, General Catalogue PHYSICS, 516 32 Current Balance, pág. 268, Germany, 1992.
5. JEULIN, Física Química, Material Didáctico, Catálogo 1995/96, pág. 40, Francia.
6. PASCO, 2001 PHYSICS and e-measure Catalog, pág. 214, USA, 2000.
7. PHYWE, Laboratory Experiments, Physics, 4.1.06-01/15, pág. 156, Göttingen, 2005.
8. Del siguiente sitio tomamos la fotografía de Cotton. En él se pueden encontrar algunos datos biográficos: http://www.ipnl.in2p3.fr/delphi/laktineh/monitorat/public_html/cotton/cotton.html
9. The Use of a Current Balance. Warburton, F. E., American Journal of Physics, vol 4, pág. 125, 1936.
10. Experimento 51 Medida de un campo magnético en unidades fundamentales, pág. 86 y 87, «Física. Guía del laboratorio.» Edición Internacional, Physical Science Study Committee (PSSC), Ed. Reverté, Barcelona, 1968.
11. MSC Nº 501 Current Balance Kit, 501-1, Illustrated Assembly Guide, MACALASTER SCIENTIFIC CORPORATION, Educational Division, Watertown, Mass.
12. MSC Nº 102 AIR CORE SOLENOID, 102-2, Illustrated Assembly Guide, MACALASTER SCIENTIFIC CORPORATION, Educational Division, Watertown, Mass.
13. Sección 7-3: Campo en el interior de un solenoide, pág. 140, Prácticas de Física para preparatorios, J. Díaz, R. Pecard, Tomo II, Ed. Monteverde, Montevideo, 1971.
14. «Balanza de Campo Guía práctica Nº 23», pág. 65, Física en el Laboratorio, 2º año de Bachillerato Diversificado, parte 2, E. Tornaría, R. Mariezcurrena, IUDEP, Montevideo, Julio de 1979.

Agreadecimientos

A la Sra. Amelia Ferrari, funcionaria del Instituto de Física de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, por permitirnos acceder a materiales como el mencionado en la referencia 9 y otros no anotados.

A los institutos Liceo de Solymar 1 y Liceo Nº 10, Dr. Carlos Vaz Ferreira, por permitirnos realizar parte de la tarea que concluyó con este artículo.

Balanza de corriente

Se resumen aquí las fuentes más antiguas a las que pudimos tener acceso que presentan un experimento usualmente conocido bajo la denominación «Balanza de corriente», vinculado al que presentamos en el artículo:

9. The Use of a Current Balance. Warburton, F. E., American Journal of Physics, vol 4, pág. 125, 1936.
10. Experimento 51 Medida de un campo magnético en unidades fundamentales, pág. 86 y 87, «Física. Guía del laboratorio.» Edición Internacional, Physical Science Study Committee (PSSC), Ed. Reverté, Barcelona, 1968.
11. MSC Nº 501 Current Balance Kit, 501-1, Illustrated Assembly Guide, MACALASTER SCIENTIFIC CORPORATION, Educational Division, Watertown, Mass.

Apéndice I: Mapeo de cierta zona del imán

La figura A1 muestra como se han definido las coordenadas para el mapeo entre los polos del imán. Se ha procurado trabajar a la mitad (en términos de la coordenada «z») de las pastillas que conforman el imán, en todos los casos.

Los gráficos adjuntos muestran la determinación de la componente del campo magnético en la dirección «y», entre los polos de imán. El relevamiento se realizó mediante un conductor de longitud 1,40 cm, sometido a una intensidad fija de 4,24 A, orientado horizontalmente en la dirección «x».

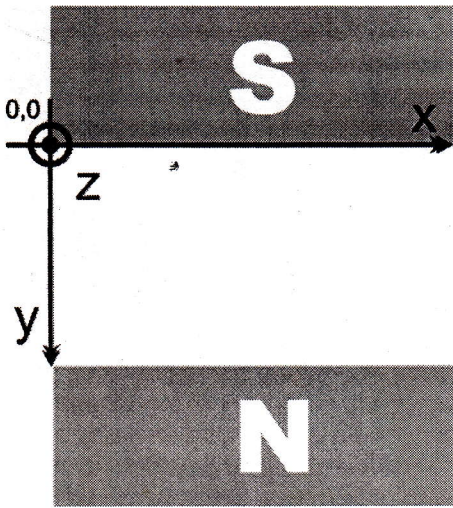


Figura A1. Definición de las coordenadas del mapeo.

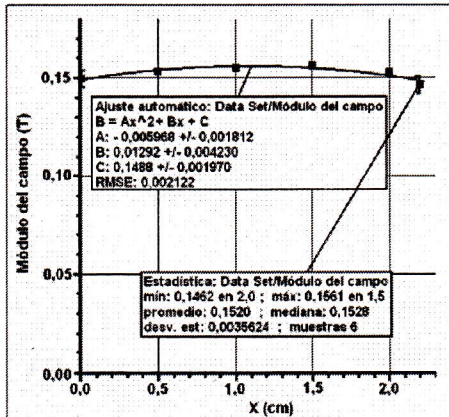


Figura A2. Módulo del campo magnético para y fijo.

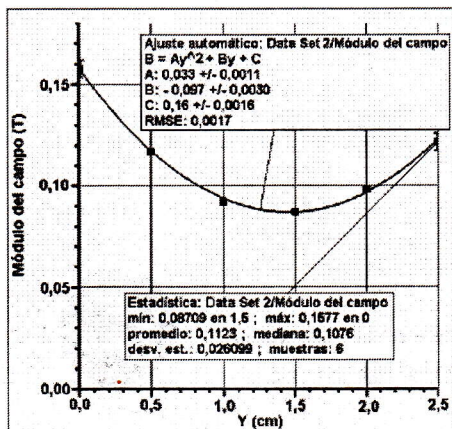


Figura A3. Módulo del campo magnético para x fijo.

La zona está limitada entre los valores 0,0 cm y 2,2 cm para la coordenada x, y entre 0,0 cm y 2,5 cm para la coordenada y.

El gráfico de la figura A2 muestra el campo para un valor «y» fijo cercano a cero, es decir, en una ubicación tan próxima a la pastilla como lo permitieron las condiciones experimentales. Se ve allí un valor casi uniforme, a lo largo del eje x.

El gráfico de la figura A3 muestra los valores determinados para un valor de x = 1,1 cm, es decir, en la zona central. Dos cuestiones parecen destacables en el gráfico: una variación apreciable de B_y en esa línea y la «asimetría» que se observa en las cercanías de los polos. Para el caso en que variamos el ángulo θ , definiremos trabajar con el conductor centrado en el punto (1,1cm ; 1,5cm).

Se han definido dos polinomios de segundo grado y las «estadísticas», en cada uno de los gráficos.

Apéndice II: construcción del imán

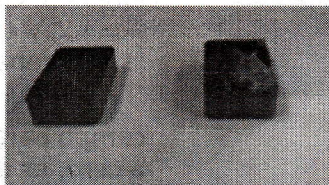
En nuestros laboratorios de Física contamos comúnmente con imanes en barra pero no con imanes en herradura, y en caso de hacerlo, éstos por lo general no se encuentran con buena magnetización. Es por esta razón que sugerimos aquí un método barato y fácil de construir el equivalente a un buen imán en herradura.

Se trata de una planchuela de hierro dulce doblada en forma de «U» (ver C en la figura) a la cual se le pegan dos piezas polares de imanes cerámicos mediante cualquier adhesivo de contacto.

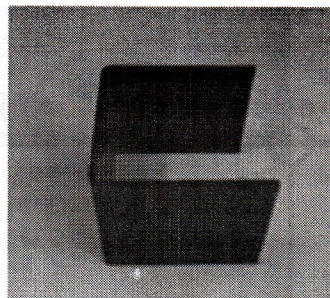
Los imanes cerámicos pueden obtenerse en veterinarias o casas dedicadas al «acuacismo», a partir de «limpia peceras magnéticas» («magnetic



A. Imanes en su pack.



B. Pastillas magnéticas ya desmontadas.



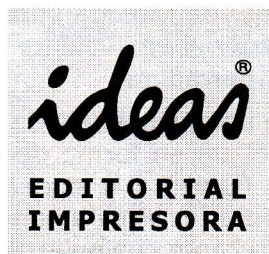
C. U de hierro dulce.

brush») como el que muestra A en la figura. Se trata de dos imanes cerámicos en forma de prisma rectangular que tienen sus polos en las caras (cuidado: existen versiones en las cuales los polos se encuentran ambos en la misma cara, lo cual no sirve).

Si se remueve el plástico y la tela que los cubre se obtienen los ima-

nes (ver B en la figura) que harán de piezas polares para nuestro imán, adheridos a los lados paralelos de la «U» de hierro con sus polos opuestos enfrentados. Debe tenerse especial cuidado con los imanes ya que si caen en la maniobra de desmontaje se quiebran con facilidad.

...



*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: 408 6985 - Montevideo, Uruguay
edideas@adinet.com.uy / www.editorialideas.com.uy



OLIMPIADA IBEROAMERICANA DE FÍSICA

Andrea Cabot¹, Pablo García²

¹Consejo de Educación Técnico Profesional, Montevideo, Uruguay;
e-mail: acabot@anep.edu.uy

²Instituto de Profesores Artigas, Montevideo, Uruguay;
e-mail: pgarcía@ucu.edu.uy

Resumen

La educación científica en su sentido más amplio, incluyendo todas las actividades del sistema formal de educación junto con otras actividades extracurriculares, adquiere cada vez más una importancia significativa como elemento clave de la cultura. A nueve años de participación ininterrumpida de nuestro país en las Olimpiadas Iberoamericanas de Física, este artículo da cuenta de la actuación de nuestra Delegación en la XIV Olimpiada Iberoamericana de Física en Chile (2009).

Desarrollo

Las Olimpiadas de Física del Uruguay son un proyecto conjunto de la Sociedad Uruguaya de Física (SUF) y la Asociación de Profesores de Física del Uruguay (APFU). Se realizan, en forma ininterrumpida, desde el año 2000, con la finalidad de seleccionar y preparar a los estudiantes que representarán a Uruguay en las Olimpiadas Iberoamericanas de Física (OIbF).

Con estas acciones, se busca avanzar en el logro de los siguientes objetivos:

- Estimular el estudio de la Física, posibilitando el intercambio académico entre los docentes y el desarrollo de los jóvenes talentos en esta ciencia.
- Propiciar el intercambio de experiencias y la profundización de la

amistad entre los centros educativos participantes.

- Promover la realización y desarrollo de competencias que contribuyan a fomentar la vocación científica y tecnológica entre la juventud.
- Aproximar la Universidad a la Enseñanza Media.

La última edición de la Olimpiada iberoamericana de Física (XIV OIbF) se realizó en Santiago de Chile, entre el 27 de setiembre y el 3 de octubre de 2009, en la Universidad Andrés Bello.

En la conferencia inaugural, el científico Miguel Kiwi, destacó la importancia de los descubrimientos que se han hecho en el área. También recordó que las primeras competencias de este tipo se realizaron en el siglo XIX y que quienes han resultado ganadores se han transformado luego en grandes científicos.

Participaron estudiantes de diecinueve delegaciones de países iberoamericanos: Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Costa Rica, Cuba, Ecuador, El Salvador, España, Guatemala, México, Panamá, Paraguay, Perú, Portugal, Puerto Rico, República Dominicana y Uruguay.

Principalmente, hemos de destacar los resultados obtenidos por los estudiantes que representaron a Uruguay, que demostraron sus capacidades y conocimientos y obtuvieron los siguientes resultados:

- **Maximiliano Isi.**
Medalla de Bronce.
- **Diego Silvera.**
Mención Honorífica.
- **Nicolás Uviedo.**
Mención Honorífica.
- **Inés Rauschert,**
Mención Honorífica.

Durante la XIV OIbB, de acuerdo con el Reglamento, se celebraron las correspondientes reuniones del Jurado Internacional, compuesto por los profesores delegados de los países participantes, para revisar y discutir las pruebas, así como para la calificación de las mismas. Estas pruebas se encuentran disponibles en el sitio web <http://www.olimpiadafisica.cl/>. En esta oportunidad también se procedió a designar (por votación) al Secretariado Permanente de la OIbF para el periodo 2010-2014, que quedó integrado por los profesores:

- *Presidente:*
Victor Hamity (Argentina)
- *Vice Presidente:*
Andrea Cabot (Uruguay)

- *Vocal:*
Carlos González (Paraguay)
- *Vocal:*
Omayra Perez (Panamá)
- *Vocal:*
Luis Huerta (Chile)

En la reunión final de delegados se procedió al análisis global y estadístico de los resultados (todavía anónimos). Posteriormente la Prof. Omayra Perez, delegada de Panamá, presentó el proyecto de la XV OibF que se celebrará en su país en setiembre del 2010.

Ya estamos organizando la prueba preparatoria y clasificatoria para seleccionar la Delegación que participará en Panamá. Este año implementamos una nueva modalidad que facilita la participación de estudiantes de todo país, desde cada localidad en forma simultánea.

Esperamos y confiamos que participar en la Olimpiada de Física sea una actividad grata para todos y que al mismo tiempo continúe realizando aportes a la formación científica de nuestra Educación Media.



PROPUESTA DE UTILIZACIÓN DE INTERNET

para laboratorios remotos en la enseñanza de
circuitos eléctricos en carreras de ingeniería

Cecilia Culzoni, Hugo Kofman, Pablo Lucero, Rubén Monje

Universidad Tecnológica Nacional; Universidad Nacional del Litoral.

e-mail: gdesuque@arnet.com.ar

Artículo

Resumen

El Laboratorio Remoto como medio didáctico ofrece una opción diferente del uso de Internet para la educación. Su ubicación dentro de una conceptualización de los medios didácticos permite una valoración de sus posibilidades para la enseñanza universitaria. En este caso en particular se describe una propuesta de utilización de laboratorio remoto para el estudio de circuitos eléctricos en régimen transitorio para carreras de ingeniería.

La experiencia que se describe se desarrolló dentro del proyecto de investigación «"Sensoramiento" y Laboratorios remotos para la investigación y la enseñanza de las ciencias», que se realiza en la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Litoral (Santa Fe, Argentina); el cual está integrado por docentes de dicha facultad y de la Facultad Regional Rafaela de la Universidad Tecnológica Nacional. La misma consistió en una clase teórico – práctica con laboratorios remotos para el estudio de circuitos eléctricos.

El laboratorio al que hacemos referencia se encuentra en construcción en la U.N.L. y cuenta actualmente con una experiencia para el estudio de régimen transitorio en circuitos eléctricos. Se encuentran en etapa de construcción tres experiencias más.

Palabras clave: laboratorios remotos, física, internet, educación.

Marco teórico

Educación e Internet

Dentro de las posibilidades que Internet ofrece a la educación se distinguen según Anahí Mansur en «Los nuevos entornos comunicacionales y el salón de clases» (Litwin compiladora, 2005) tres posibles ámbitos de comunicación:

- Los Foros de Discusión: «espacio de debate temático coordinado por un moderador, en tiempos asincrónicos o diferidos». Estos sitios se ubican en diarios, revistas, portales, o plataformas educativas especialmente diseñadas.
- Los Chats: consisten en «un grupo de personas que se encuentran a conversar sin un coordinador o moderador, en general sin agenda y en tiempo sincrónico on-line.»
- Correo electrónico: «es el programa de comunicación de uso más extendido, que permite en tiempo diferido, el intercambio de textos de tipo epistolar».

Adriana Gewer (2007) en «Internet en las situaciones de enseñanza y aprendizaje» expone diferentes niveles de uso de Internet desde su no utilización hasta la total utilización a través de la enseñanza on-line.

Desde la búsqueda de información actualizada, hasta la incorporación de una plataforma educativa, el docen-

te puede realizar diversas propuestas didácticas donde incorpora Internet en el diseño de sus clases. Como dice E. Litwin (2005) «Los nuevos entornos comunicacionales (como Internet) también entran en el salón de clase y dan cuenta de las orientaciones o las restricciones de uso de cada docente».

Laboratorios Remotos

Sin lugar a dudas el Laboratorio Remoto, como aplicación de uso de Internet, se constituye en una propuesta novedosa para la enseñanza, y más aún para la enseñanza de la Física Básica en carreras universitarias. «Un laboratorio remoto (LR) consiste en el montaje de un conjunto de materiales, dispositivos e instrumentos en un lugar físico determinado para permitir la realización de experimentos reales que son comandados por un operador que está ubicado en un lugar distante del mismo y con el cual se establecen relaciones mediante algún sistema de comunicación, tal como Internet.» (Culzoni, Kofman, et al, 2007). Se distingue entonces entre laboratorios remotos y laboratorios virtuales, siendo estos últimos constituidos por simulaciones computacionales que pueden estar disponibles o no en la Web.

«Desde un punto de vista técnico, el experimento remoto está vinculado al control automático y a la robótica. Sus primeras aplicaciones estuvieron orientadas a resolver problemas de inseguridad o de no habitabilidad de algunos ambientes en los que debían realizarse ciertas operaciones o ensayos.» (Culzoni, Kofman, et al, 2007)

Los Laboratorios Remotos tienen ventajas e inconvenientes. Las primeras son fundamentalmente la posibilidad de acceso a experiencias y

equipamientos costosos que se sitúan en un único sitio por parte de gran cantidad de alumnos de diferentes lugares. La solución a los horarios de utilización del laboratorio y la optimización de los recursos. Los inconvenientes citados por diversos autores son por ejemplo la pérdida de contacto con la experiencia, la no visualización de las mismas (Rosado, Herreros, 2005).

Sin embargo, y como todo recurso didáctico, el laboratorio remoto puede ser utilizado eficazmente dentro de una intervención áulica que lo incluya como medio de resolución de problemas físicos, como forma de visualizar experiencias, adquirir datos medidos y realizar las gráficas correspondientes, como herramienta que relacione al alumno con los procedimientos propios e inherentes a las ciencias experimentales y como un recurso más que propicie la comprensión de los fenómenos físicos.

Ubicación del Laboratorio Remoto dentro de una conceptualización y clasificación de medios didácticos

«Frente a la visión de los medios como meros soportes físicos que vehiculan información, y cuyo potencial de aprendizaje se fundamenta en el grado de similitud de la representación a su referente, en los últimos años ha ido consolidándose una propuesta que ofrece un marco teórico suficientemente potente como para prever y explicar los impactos diferenciales de los medios sobre el aprendizaje de los sujetos»..... «Son los sistemas simbólicos el atributo clave para explicar la interacción entre los sujetos, los medios y el aprendizaje» (Area Moreira, 2007).

Según Salomón los atributos fundamentales de todo medio son los siguientes:

- Los atributos tecnológicos, afectan la difusión de la información.
- Los contenidos, aunque suelen ser el principal objetivo de los docentes, parece ser que es más importante la forma de codificarlos que los mensajes en sí.
- Marcos y situaciones sociales, es un atributo externo al medio en sí. Los efectos de los medios varían según las condiciones de su uso.
- Sistemas de símbolos, son los elementos que representan de alguna forma específica un conocimiento, como el lenguaje, cartografía, símbolos matemáticos. Los sistemas simbólicos «afectan a las representaciones cognitivas de los sujetos que con ellos interactúan». (Area Moreira, 2007).

Los sistemas de símbolos y su relación con los distintos medios, tienen una importancia fundamental, ya que diferentes sistemas simbólicos se vinculan con diferentes áreas del conocimiento y éste puede ser transportado por uno u otro medio.

«Un sistema de símbolos comunica mejor que otro no a causa de un parecido entre el símbolo representado y su referente, sino porque un sistema de símbolos, en comparación con otros, puede presentar la información en mejor correspondencia al modo de representación que un individuo, con una determinada estructura cognitiva y una tarea dada, puede utilizar mejor» (Salomón; en Area Moreira, 2007)

Area Moreira, realiza una clasificación de los medios, de la cual tomamos dos categorías: los medios manipulativos y los informáticos que a su vez podremos relacionar.

Los medios manipulativos son los que se utilizan en una modalidad de experiencia del aprendizaje, por sí mis-

mos no producen aprendizajes sino que deben utilizarse intencionalmente bajo un contexto de enseñanza. Incluimos aquí los materiales de laboratorio que se utilizan para experiencias, instrumentos de medición, muestras de materiales, muestras de suelos, máquinas, dispositivos, etc. Los medios informáticos se caracterizan por incluir cualquier modalidad de codificación simbólica de la información, formas verbales, imágenes, sonidos, gráficas, fórmulas, números.

El Laboratorio Remoto reúne en sí las dos categorías detalladas. Contiene en su lugar de ubicación medios manipulativos que permiten la realización de experiencias reales y utiliza los medios informáticos para posibilitar el control, visualización y obtención de datos a distancia. A partir de esta coincidencia podemos entender que aporta las cualidades y características específicas de cada una de las categorías a la vez que posibilita la utilización de diferentes sistemas simbólicos para transmitir la información. En este último aspecto los sistemas simbólicos utilizados son comparables con los que posibilita una experiencia real con mediciones realizadas utilizando placas o interfases de adquisición de datos a una PC, que incluyen visualización de la experiencia, tablas de valores, curvas de evolución de magnitudes medidas, códigos matemáticos y gráficos que posibilitan la comprensión del fenómeno físico. ¿Qué nuevas posibilidades aporta entonces el laboratorio remoto como medio didáctico? Fundamentalmente consideramos que hace factible la optimización de recursos físicos y humanos disponibles y permite tomar contacto con una tecnología que es el control a distancia de máquinas y equipos propia de los procesos productivos actuales.

Desarrollo de la experiencia

Propuesta pedagógica de utilización de Laboratorios Remotos en carreras de Ingeniería

Esta clase se llevó a cabo con alumnos de carreras de Ingeniería Electromecánica e Ingeniería Industrial que cursan Física II en la UTN Facultad Regional Rafaela. Se propuso una clase teórico-práctica de laboratorio con utilización de laboratorio remoto para el estudio del comportamiento en régimen transitorio de circuitos RC, RL y RLC alimentados con corriente continua. Se trabajó en forma paralela con un laboratorio remoto ubicado en la Facultad de Ingeniería Química de la UNL en la ciudad de Santa Fe y con idéntico equipamiento disponible en nuestro laboratorio. Es de destacar que se planificó de este modo dado que era la primera experiencia remota que realizábamos.

Esta intervención áulica incluye una dimensión disciplinar ya que aborda conocimientos específicos de la asignatura con una metodología innovadora que la constituye el laboratorio remoto. También involucra una dimensión de investigación ya que son las primeras clases de Física Básica utilizando laboratorios remotos entre dos universidades argentinas. Los alumnos de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Rafaela son los primeros usuarios en una clase piloto de una experiencia de un laboratorio remoto que se está construyendo en la Facultad de Ing. Química de la Universidad Nacional del Litoral en Santa Fe. Tiene una dimensión pedagógica ya que se fundamenta en la necesidad de realizar actividades que promuevan la comprensión de los contenidos a abordar e involucra además una dimensión tecnológica, por promover las dos universidades el desarrollo científico

tecnológico aplicado a la Ingeniería y se encuentra en relación directa con la realidad social que encontrará el futuro ingeniero en su trabajo profesional. El «*sensoramiento*» remoto y el control a distancia de experiencias y máquinas es ya una realidad industrial en el ámbito local y nacional.

Adquiere una dimensión social y colaborativa de doble alcance. Se enmarca en un proyecto de investigación donde participamos docentes de la UNL y de la UTN trabajando y compartiendo experiencias que nos permiten mejorar la educación. Propone un trabajo en colaboración entre alumnos que compartirán en grupos reducidos la experiencia a distancia, analizarán problemas a partir de ella y buscarán soluciones en conjunto.

Hemos basado esta propuesta en los conceptos pedagógicos que asignan a la interacción social y a la interacción con los medios una singular importancia. «El desarrollo cognitivo emerge de la interacción social y de la mediación semiótica que caracterizan la vida en sociedad»....» El aprendizaje estimula y activa una variedad de procesos mentales que afloran en el marco de la interacción con otras personas». «Los instrumentos mediadores (herramientas y signos) no sólo facilitan la acción humana, sino que la transforman».... «El dominio de herramientas y signos dará nuevas posibilidades a las funciones cognitivas superiores». (Rodríguez Arocho, 2000)

Para llevar a la práctica este concepto es que se proponen las actividades en grupos de trabajo pequeños en los cuales los alumnos deben resolver problemas que los motivan a negociar y construir conocimientos. La simbología utilizada por el medio varía desde una tabla de números, que constituyen los valores obteni-

dos de la experiencia a su gráfica correspondiente. La visualización de las gráficas prácticamente en tiempo real posibilita la adquisición del conocimiento desde otro sistema de códigos, que sumado a la expresión matemática y la descripción verbal del fenómeno provee al alumno de otra herramienta para relacionar los nuevos conocimientos con su estructura cognitiva previa. A los fines de lograr incentivar las funciones cognitivas superiores se proponen actividades que relacionen la tabla de datos con la gráfica, que busquen las causas de posibles diferencias entre la gráfica real y la que provee el modelo físico idealizado, valorando de este modo la medición real como fuente de validación de la teoría.

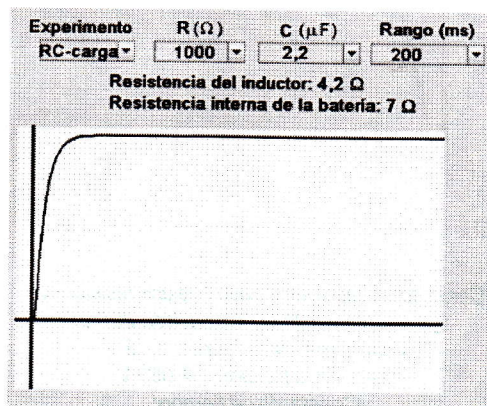
Evaluación de la experiencia

Dadas las características exploratorias de esta experiencia realizaremos un análisis cualitativo de la misma, basándonos en las apreciaciones del docente que la llevó a cabo, de la manifestación de los alumnos y de los resultados obtenidos de los informes presentados.

Se pudo observar que los alumnos trabajaron con especiales expectativas y entusiasmo al poder manipular y controlar una experiencia real que se estaba desarrollando a 90 km de distancia. No hubo ningún tipo de problemas técnicos ni de utilización de software. La página del laboratorio es de muy fácil acceso, los requerimientos técnicos son mínimos y los estudiantes están en perfectas condiciones de manejar la experiencia por sí solos. Como se había armado en paralelo el mismo circuito en nuestro laboratorio, los alumnos comparaban las gráficas obtenidas con nuestro equipo, con las provenientes del laboratorio remoto. Esto posibilitó también superponer la simulación computacional a la gráfica real para evaluar di-

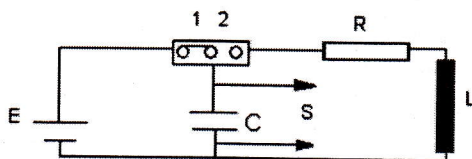
ferencias entre el modelo y la realidad. Destacamos esta función del equipo ya que pocas veces podemos observar y comparar los resultados de un experimento real con los que resultan de aplicar el modelo matemático. Esta función se logra casi en exclusivo mediante la utilización de las Nuevas Tecnologías de la Información y la Comunicación (NTICs).

A continuación se ofrecen parte de las curvas obtenidas por los alumnos mediante el uso del laboratorio remoto y del equipo propio para el estudio de carga y descarga de capacitores y oscilaciones electromagnéticas.



Carga de un capacitor a través de una resistencia con laboratorio remoto.

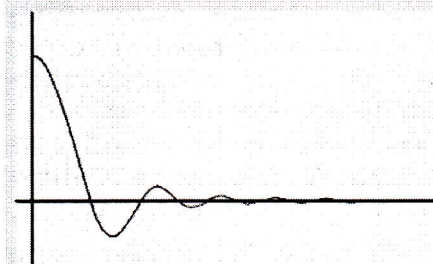
Gráfica de oscilaciones electromagnéticas del siguiente circuito:



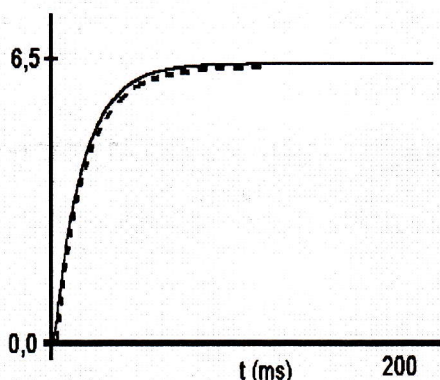
Agregamos algunas gráficas obtenidas por medición del equipo propio situado en nuestro laboratorio, donde la curva llena corresponde al modelo ideal y la punteada a la medición real.

Experimento	R (Ω)	C (μ F)	Rango (ms)
RLC descarga	10	22	200

Resistencia del inductor: 4,2 Ω
Resistencia interna de la batería: 7 Ω



Oscilación electromagnética de un circuito RLC sin alimentación con laboratorio remoto.



Carga de un capacitor a través de una resistencia.

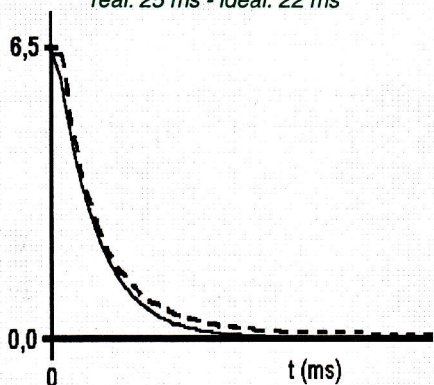
Resistencia: 100 Ω / Capacitor: 220 μ F

Voltaje real de la fuente: 6,45 V

63 % de la tensión = 4.063 V

Constante de tiempo:

real: 25 ms - ideal: 22 ms



Descarga de un capacitor a través de una resistencia. Resistencia: 100 Ω
Capacitor: 100 μ F

Voltaje real de la fuente: 6,45 V

63 % de la tensión = 4.063 V

Constante de tiempo:

real: 6.3 ms - ideal: 10 ms

Conclusiones

La evaluación de los informes demuestra que los alumnos logran resolver satisfactoriamente las actividades propuestas en su mayoría en la primera entrega del informe. Se destaca que este trabajo se realiza sobre el final del cuatrimestre y que los estudiantes ya están habituados con nuestra metodología de trabajo.

Siendo que la comparación entre el modelo ideal y la experiencia real enriquece el análisis y hace a un problema específico de la Física, se propuso incorporar una simulación computacional a la pantalla que ofrece el laboratorio remoto de modo de disponer de la misma superpuesta a la gráfica real. Esto se encontrará disponible a la brevedad.

Para hacer realidad la flexibilidad del acceso al laboratorio se planificó para el próximo año la entrega de una guía con la actividad a realizar y unas breves instrucciones de uso del laboratorio a los fines de que cada alumno pueda hacer el trabajo desde la sala de computación de la facultad o desde su casa en día y horario que desee. De esta forma liberamos horas de clase para otras prácticas de laboratorio presenciales.

Para los alumnos constituyó el primer contacto, dentro de sus estudios universitarios, de control a distancia de una experiencia, hecho que los relaciona con una tecnología que es de aplicación actual en la industria.

Desde la realización de esta experiencia a la fecha, la página del laboratorio se ha enriquecido con instrucciones de uso, explicaciones, disponibilidad de acceder al software requerido para el funcionamiento, flexibilidad de las coordenadas de las gráficas, etc.

El laboratorio está disponible las 24 horas del día, todos los días del año y

puede ser utilizado por cualquier persona. Ha sido utilizado por alumnos de la misma Facultad de Ing. Química y estamos promoviendo su utilización a otros centros educativos.

Seguimos trabajando en la mejora de esta metodología que consideramos innovadora y que posibilitará a muchas instituciones el acceso sin costo a experiencias físicas reales, que requieren de equipamiento de cierta complejidad que no todos disponen.

Bibliografía

- GEWER Adriana (2007). *Internet en las situaciones de enseñanza y aprendizaje*. Universidad de Santiago de Compostela, Curso Enseñanza y Aprendizaje. Maestría en Procesos educativos mediados por tecnologías. Universidad Nacional de Córdoba.
- LITWIN, Edith (2005). *Tecnologías educativas en tiempos de Internet*. Buenos Aires, Argentina. Amorrortu editores.
- AREA MOREIRA, Manuel (2007) «Los medios de enseñanza: conceptualización y tipología». en
- CÁtedra Tecnología educativa Universidad de La Laguna. Curso Enseñanza y Aprendizaje. Maestría en Procesos educativos mediados por tecnologías. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.
- RODRÍGUEZ AROCHO, Wanda (2000) «Una aproximación histórico cultural a la revolución cognoscitiva de cara al nuevo milenio» en Educere artículos, año 2, Nº 8. Venezuela.
- ROSADO, L. y HERREROS, J. R. (2005). *Nuevas aportaciones didácticas de los laboratorios virtuales y remotos en la enseñanza de la Física*. Third International Conference on Multimedia and Information & Communication Technologies in Education (m-ICTE 2005). Badajoz, España. <http://www.formatex.org/micte2005/286.pdf>
- CULZONI, C.; KOFMAN, H.; LUCERO, P; ENRIQUE, C.; CARRERA, R (2007), *Laboratorios remotos en educación: perspectivas para la física básica*, XV Reunión de Educación en Física

• • •

SITUACIONES PROBLEMÁTICAS EN FÍSICA (I)

Carlos Zalmavide

Facultad de Ingeniería y Tecnologías, Universidad Católica Dámaso Larrañaga, Montevideo, Uruguay; e-mail: czamalvi@gmail.com

Introducción

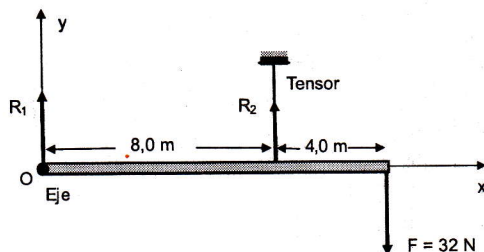
Existen problemas elementales de Física tales que, si se introduce en su formulación una pequeña variante, pueden convertirse en situaciones que requieren un enfoque especial y en algunos casos una muy interesante forma de resolución.

Presentamos un conocido ejercicio de estática, que seguramente todos nosotros hemos propuesto y resuelto, en muchas oportunidades, con nuestros alumnos.

A. Planteo del ejercicio elemental

Sea una barra capaz de girar libremente alrededor de un eje horizontal por el punto O. Sobre la barra se ejerce una fuerza externa F en la dirección Oy (vertical) la barra está sostenida por un tensor AB (podría ser un alambre) que es capaz de ejercer sobre la barra una fuerza también vertical. Nos proponemos calcular las fuerzas que ejercen el eje y el tensor sobre la barra.

Diagrama de las fuerzas actuantes:



La fuerza reactiva que ejerce el eje sobre la barra es necesariamente vertical pues el resto de las fuerzas que se aplican sobre la barra solamente poseen componentes en esa dirección.

R_1 : fuerza reactiva que ejerce el eje sobre la barra.

R_2 : fuerza reactiva que ejerce el tensor sobre la barra.

F : fuerza externa conocida ($F = 32$ N).

Consideraremos a la barra un cuerpo rígido y plantearemos las condiciones de equilibrio correspondientes:

- I. Resultante de las fuerzas externas igual a cero.
- II. Resultante de momentos de las fuerzas externas respecto de un punto (cualquiera) igual a cero.

Existen dos incógnitas, las fuerzas R_1 y R_2 y podemos plantear dos relaciones entre ellas: las condiciones de equilibrio; tendremos un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas que podemos resolver fácilmente.

Con los valores indicados:

$$\sum F_y = 0 \quad R_1 + R_2 - 32 = 0$$

$$\sum M_o = 0 \quad 8R_2 - 12 \times 32 = 0$$

Que resuelto resulta

$$R_2 = 48 \text{ N}$$

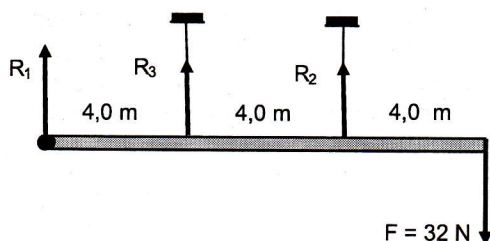
$$R_1 = -16 \text{ N}$$

(El eje está ejerciendo una fuerza «hacia abajo»).

B. Pequeña variante al problema elemental

Un alumno ocurrente puede preguntar: ¿Profesor, cómo resolvemos el problema si en vez de un tensor tenemos dos tensores?

La situación ahora planteada se corresponde con el siguiente esquema donde se ha agregado un nuevo tensor (situado 4,0 m a la izquierda del primero) que origina una nueva fuerza desconocida vertical R_3 .



¡No respondamos al alumno ocurrente: «Lo resolvemos de la misma forma»!

Resolverlo de la misma forma implicaría plantear nuevamente las condiciones de equilibrio de un cuerpo rígido:

- I. Resultante de las fuerzas externas igual a cero.
- II. Resultante de momentos de las fuerzas externas respecto de un punto (cualquiera) igual a cero.

$$\sum F_y = 0 \quad R_1 + R_2 + R_3 - 32 = 0$$

$$\sum M_o = 0 \quad 8R_2 + 4R_3 - 12 \times 32 = 0$$

...

Tenemos ahora **tres** incógnitas vinculadas por **dos** ecuaciones. *No existen más vínculos entre las tres incógnitas que las dos condiciones de equilibrio.*

Resolverlo «de la misma forma» nos lleva a un sistema de ecuaciones indeterminado como forma de calcular las fuerzas incógnitas.

¿Se trata efectivamente, desde un punto de vista Físico, de un problema indeterminado?

Claramente no; si realizamos un montaje experimental y medimos las fuerzas, las mismas tienen un valor determinado que se repite tantas veces realicemos la experiencia en condiciones semejantes. Los dos tensores «hacen fuerza» y siempre la misma fuerza.

Hemos llegado a un callejón sin salida en el intento de resolución de una situación problemática sencilla y aparentemente elemental.

Hemos planteado un problema que se corresponde con una situación física concreta y realizable experimentalmente.

La aplicación de las leyes físicas que consideramos apropiadas nos llevan a una contradicción: Indeterminación teórica frente a determinación experimental.

¿Cómo se resuelve esta aparente contradicción entre los resultados experimentales y las conclusiones teóricas?

MEDIDAS DE RESISTENCIA EN CONDUCTORES NO ÓHMICOS (I)

Fernando Fontán Bartibás

Escuela de Tecnología, Facultad de Ingeniería, Universidad ORT
Montevideo, Uruguay; e-mail: ffontan@adinet.com.uy

Artículo

Resumen

El comportamiento de un conductor no óhmico en un circuito dado depende de las características de dicho circuito. Es así que se pueden encontrar tres tipos de comportamiento y en consecuencia hay tres formas de calcular la resistencia de un conductor no óhmico. Se analizarán las distintas formas de calcular la resistencia en un elemento no óhmico y se realizarán las medidas correspondientes en un diodo.

Palabras clave

Conductor óhmico y no óhmico, resistencia estática, resistencia dinámica, resistencia promedio.

A. Introducción

En las sustancias conductoras, la intensidad de corriente (I) que circula por ellas es función de la diferencia de potencial aplicada¹ (V),

$$I = f(V) \quad (01)$$

La Ley de Ohm [1] establece que para algunas sustancias existe una proporcionalidad directa entre las magnitudes antedichas,

$$I \propto V \quad (02)$$

Para estas sustancias, la constante de proporcionalidad entre el voltaje y la intensidad de corriente representa la resistencia eléctrica de dicha sustancia,

$$\frac{V}{I} = R \quad (03)$$

Obviamente la Ley de Ohm se trata, más que de una ley general, del comportamiento de algunas sustancias. Para poner de manifiesto esta situación se definen las sustancias óhmicas y las no óhmicas. Las primeras son las sustancias para las cuales se cumple la ley de Ohm y las segundas no.

En términos de la ecuación (01) diremos que para las sustancias óhmicas la función « f » es lineal mientras que para las no óhmicas no lo es. En términos de la ecuación (03) diremos que para las sustancias óhmicas la resistencia es constante y por tanto independiente del voltaje aplicado, hecho que debe verificarse manteniendo constantes todos los parámetros que afectan la resistencia como ser: temperatura, presión, intensidad luminosa, etc.

Para las sustancias no óhmicas no es tan clara la definición de resistencia, en el presente artículo trataremos de definir dicha resistencia y como medirla.

B. Un problema de resistencias

José es el encargado de mantenimiento de una fábrica. Entre todos los equipos a su cargo hay uno cuyo esquema se muestra en la figura 1.

¹ De aquí en más, al no haber posibles confusiones con el potencial eléctrico, emplearemos la letra V para designar la diferencia de potencial o voltaje.

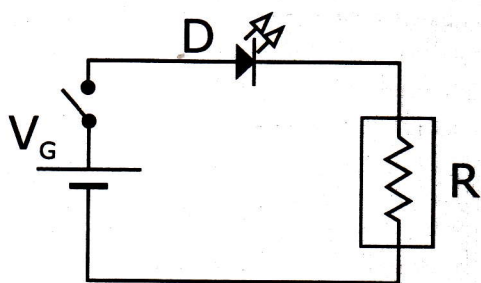


Figura 1. Circuito del equipo.

El rectángulo representa un dispositivo electrónico que se comporta como un elemento óhmico (de aquí en más lo consideraremos un resistor R), el diodo LED (D) cumple dos funciones: indica si el dispositivo está encendido y provee una caída de potencial para adecuar el voltaje del generador al dispositivo. Además hay un generador y un interruptor.

José, como buen encargado de mantenimiento, ha medido los voltajes e intensidad de corriente en los componentes del equipo y ha realizado la gráfica² $V = f(I)$ del LED por si ocurre algún fallo y debe reemplazar algún componente.

Dichas medidas y la gráfica se muestran a continuación. Las características del instrumental empleado y el software para graficar se describen en el Apéndice A.

Cierta día se quema el LED y al intentar José reponerlo, descubre que no hay ninguno entre los repuestos. Para continuar con el equipo operativo decide reemplazar el LED por un resistor. Si bien pierde la indicación visual del encendido del equipo, el resistor proveerá la caída de potencial necesaria para que el dispositivo funcione con el voltaje requerido.

Tabla I: Datos del LED

I (mA)	V (V)
$0,001 \pm 0,002$	$2.04 \pm 0,03$
$0,002 \pm 0,002$	$2.11 \pm 0,03$
$0,005 \pm 0,002$	$2.19 \pm 0,03$
$0,010 \pm 0,002$	$2.23 \pm 0,03$
$0,020 \pm 0,002$	$2.30 \pm 0,03$
$0,050 \pm 0,003$	$2.38 \pm 0,03$
$0,100 \pm 0,003$	$2.45 \pm 0,03$
$0,200 \pm 0,004$	$2.51 \pm 0,04$
$0.500 \pm 0,007$	$2.61 \pm 0,04$
$1,00 \pm 0,01$	$2.70 \pm 0,04$
$2,00 \pm 0,02$	$2.81 \pm 0,04$
$5,00 \pm 0,09$	$3.03 \pm 0,04$
$10,0 \pm 0,2$	$3.23 \pm 0,04$
$20,0 \pm 0,3$	$3.64 \pm 0,05$

Tabla II: Datos del circuito

$$V_D = (3,23 \pm 0,02) \text{ V}$$

$$V_R = (9,88 \pm 0,06) \text{ V}$$

$$V_G = (13,11 \pm 0,08) \text{ V}$$

$$I = (10,0 \pm 0,2) \text{ mA}$$

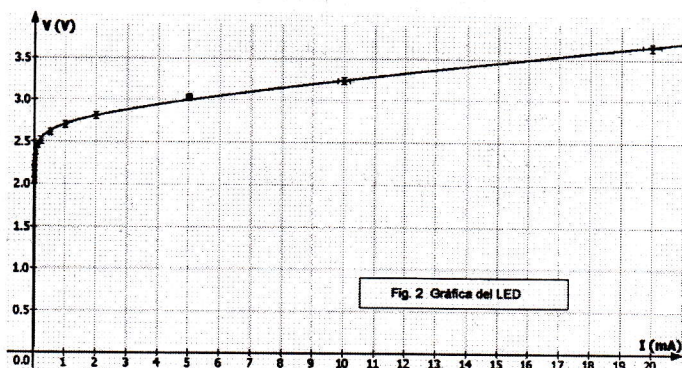


Figura 2. Gráfica del LED.

² En aras de simplificar los conceptos y los cálculos se ha optado por la gráfica $V = f(I)$ en lugar de la clásica gráfica $I = f(V)$ realizada para los semiconductores, ya que en éstos la intensidad de corriente depende del voltaje aplicado.

Le dice a su ayudante Miguel:

–Miguel, vamos a reemplazar el LED por un resistor, por favor, busca los valores que hemos medido y divide el voltaje del LED entre la intensidad de corriente, así sabremos el valor de resistencia que necesitamos para sustituir el LED.

Miguel, un joven que cursó Bachillerato, le dice a José:

–No José, como el LED es un elemento no óhmico³, su resistencia la debemos calcular a partir de su gráfica $V = f(I)$. La resistencia es la pendiente de la tangente trazada en el punto de trabajo⁴.

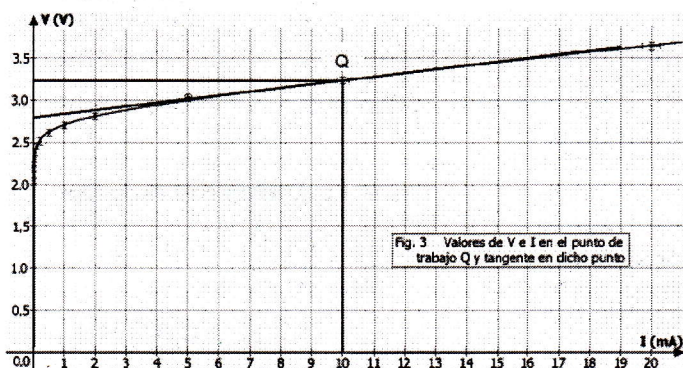


Figura 3. Valores de V e I en el punto de trabajo Q y tangentes en dicho punto.

Ambas propuestas se muestran a continuación:

Según José:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{3,23}{0,010} = 323 \, \Omega \quad (04)$$

$$\begin{aligned} \delta R &= \left(\frac{\delta V}{V} + \frac{\delta I}{I} \right) \times R = \\ &= \left(\frac{0,03}{3,23} + \frac{0,2}{10} \right) \times 323 = \\ &= 9,46 \, \Omega \end{aligned} \quad (05)$$

$$R = (323 \pm 9) \, \Omega \quad (06)$$

Según Miguel: Se traza la tangente en $I = 10 \, \text{mA}$, su pendiente⁵ (y por tanto la resistencia) es:

$$\text{pend} = R = (44 \pm 2) \, \Omega \quad (07)$$

Los valores de resistencia obtenidos son totalmente diferentes, obviamente alguno se equivocó. ¿Quién tiene razón, José o Miguel?

C. Definiciones

En realidad ambas formas de calcular la resistencia de un elemento no óhmico son correctas, **pero aplicables a situaciones diferentes**. Podemos encontrar tres situaciones distintas y por lo tanto tres formas de calcular la resistencia de un elemento no óhmico.

1. Resistencia estática o de corriente continua [2]

Definimos esta resistencia como el cociente entre el voltaje que hay en el elemento y la intensidad de corriente que circula por él:

$$R_E = \frac{V}{I} \quad (08)$$

Si no hay ambigüedad se emplea el símbolo R en lugar de R_E .

Esta definición de resistencia es útil para los circuitos de corriente continua en los cuales los valores de voltaje e intensidad son constantes en el tiempo (no consideramos los len-

³ Los diodos son dispositivos semiconductores que presentan un comportamiento no óhmico.

⁴ El punto de trabajo es el punto sobre la curva $V = f(I)$ del elemento considerado, correspondiente a la pareja de valores V e I de funcionamiento en continua. Se representa con la letra Q (del inglés Quiescent Operating Point).

⁵ En el Apéndice B se muestra el procedimiento seguido para determinar la pendiente con su incertidumbre.

tos valores de deriva debido a factores como la temperatura).

Como se ve, esta definición se ajusta a la situación descrita en la parte B, por lo tanto el cálculo propuesto por José es el correcto.

Hagamos la comprobación sustituyendo el diodo por un resistor (R_D) de resistencia 323 Ω .

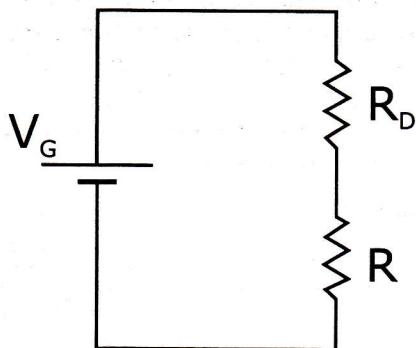


Figura 4. Circuito equivalente.

Tabla II: Datos del circuito

$V_D = (3,23 \pm 0,02) \text{ V}$
$V_R = (9,88 \pm 0,06) \text{ V}$
$V_G = (13,11 \pm 0,08) \text{ V}$
$I = (10,0 \pm 0,2) \text{ mA}$

De los datos originales calculamos la resistencia del equipo (R):

$$R = \frac{V_R}{I} = \frac{9,88}{0,010} = 988 \Omega \quad (09)$$

$$\begin{aligned} \delta R &= \left(\frac{\delta V_R}{V_R} + \frac{\delta I}{I} \right) \times R = \\ &= \left(\frac{0,06}{9,88} + \frac{0,2}{10} \right) \times 988 = \quad (10) \\ &= 25,76 \Omega \end{aligned}$$

$$R = (9,9 \pm 0,3) \times 10^2 \Omega \quad (11)$$

Así que ahora el circuito equivalente tiene: $V_G = (13,11 \pm 0,08) \text{ V}$,

$$R = (9,9 \pm 0,3) \times 10^2 \Omega \text{ y } R_D = (323 \pm 9) \Omega.$$

Calculamos la intensidad de corriente:

$$\begin{aligned} I &= \frac{V_G}{R + R_D} = \\ &= \frac{13,11}{9,9 \times 10^2 + 323} = \quad (12) \\ &= 9,98 \times 10^{-3} \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta I &= \left(\frac{\delta V_G}{V_G} + \frac{\delta(R + R_D)}{R + R_D} \right) \times I = \\ &= \left(\frac{0,08}{13,11} + \frac{30 + 9}{990 + 323} \right) \times \quad (13) \\ &\times 9,98 \times 10^{-3} = 3,6 \times 10^{-4} \text{ A} \end{aligned}$$

$$I = (10,0 \pm 0,4) \text{ mA} \quad (14)$$

Vemos que obtenemos el valor original de intensidad de corriente, y por tanto el valor original de voltaje en R , con lo cual comprobamos que el diodo debe ser sustituido por un resistor de resistencia 323 Ω el cual se obtiene a partir de la definición de resistencia estática.

Resumiendo, en un circuito estático de corriente continua, un conductor no óhmico tiene una resistencia dada por la expresión $R_E = V/I$.

2. Resistencia dinámica o de corriente alterna de pequeña amplitud [2]

Esta resistencia se emplea cuando los valores de voltaje e intensidad experimentan variaciones de pequeña amplitud en el tiempo. Se define como:

$$r_d = \frac{dV}{dI} \quad (15)$$

Este cálculo debe realizarse en el punto de trabajo: $V = V_Q$

Gráficamente, la resistencia dinámica se corresponde con la pendiente de la tangente en la gráfica $V = f(I)$, trazada en el punto de trabajo, lo cual se muestra en la figura 3 para $I = 10 \text{ mA}$.

En la práctica alcanza con que la amplitud del voltaje sea pequeña, entonces la ecuación (15) queda:

$$r_d = \frac{\Delta V}{\Delta I} \quad (16)$$

Siendo ΔV y ΔI los valores eficaces o los valores máximos o los valores pico a pico del voltaje y la intensidad de corriente. Aún en el caso que la corriente alterna periódica no sea senoidal, igualmente el cálculo es válido midiendo con instrumentos de «verdadero valor eficaz» (true RMS) o con un osciloscopio.

Veamos un ejemplo. En el circuito ya estudiado agregamos un generador de corriente alterna senoidal de pequeña amplitud y completamos con un amperímetro y un voltímetro de alterna, más un amperímetro de continua como se muestra en la figura 5.

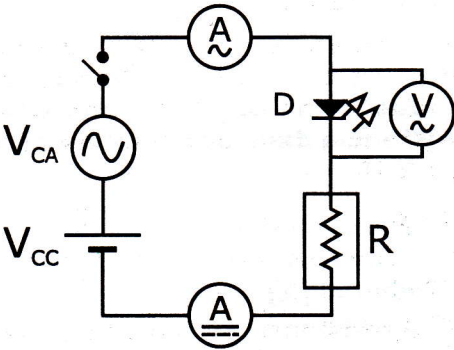


Figura 5. Circuito con la fuente de alterna.

Si bien se ha empleado un generador de alterna de muy baja impedancia, su inclusión ha alterado ligeramente el circuito. Para corregir esta situación regulamos el voltaje del generador de continua hasta obtener

una intensidad de corriente en continua de 10 mA, de esta manera nos aseguramos que el punto de trabajo sea el mismo que en el circuito estudiado en la parte B de tal manera de emplear los valores ya medidos.

El generador de alterna superpuesto al de continua produce variaciones en los valores de voltaje e intensidad alrededor del punto de trabajo. Vamos a comprobar que estas variaciones de voltaje e intensidad (valores eficaces) se relacionan entre sí a través de la resistencia dinámica del conductor no óhmico.

Cálculos:

Tabla III: Valores medidos⁶

$$\begin{aligned} V_{Def} &= (0,036 \pm 0,003) \text{ V} = \\ &= (36 \pm 3) \text{ mV} \\ I_{ef} &= (761 \pm 16) \mu\text{A} = \\ &= (0,76 \pm 0,02) \text{ mA} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} r_d &= \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V_{ef}}{I_{ef}} = \\ &= \frac{0,036}{0,76 \times 10^{-3}} = 47,4 \, \Omega \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \delta r_d &= \left(\frac{0,003}{0,036} + \frac{0,02}{0,76} \right) \times \\ &\times 47,4 = 5,2 \, \Omega \end{aligned} \quad (18)$$

$$r_d = (47 \pm 5) \, \Omega \quad (19)$$

De la figura 3 obtuvimos que la pendiente de la tangente trazada en $I = 10 \text{ mA}$ es:

$$\text{pend} = (44 \pm 2) \, \Omega \quad (07)$$

Como se ve, teniendo en cuenta la incertidumbre, podemos decir que la resistencia dinámica y la pendiente

⁶ Ver Apéndice A.

de la tangente en la gráfica $V = f(I)$ son iguales.

A veces aparecen ligeras diferencias, las cuales pueden ser atribuidas al hecho de tomar variaciones pequeñas, pero finitas, de voltaje e intensidad y no variaciones infinitesimales.

3. Resistencia promedio de alterna de gran amplitud [2]

Este caso es similar al anterior, solo que la componente de alterna es de gran amplitud y las variaciones impuestas a los valores de voltaje e intensidad abarcan zonas de diferente comportamiento del conductor no óhmico, por ello es necesario definir una resistencia promedio de los diferentes comportamientos.

Se define la resistencia promedio:

$$R_{AV} = \frac{\Delta V}{\Delta I} \quad (20)$$

Siendo ΔV y ΔI las variaciones de voltaje e intensidad como se muestra en la figura 6.

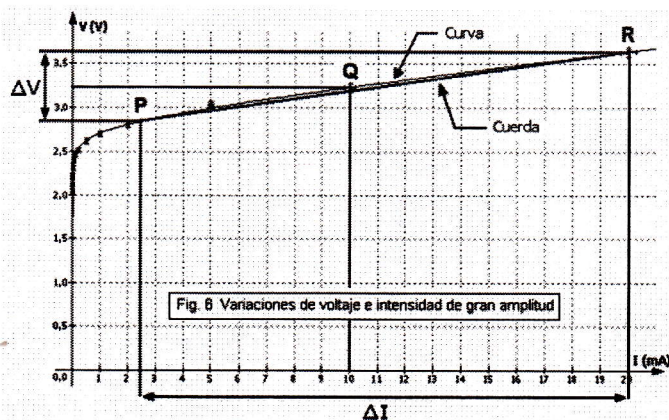


Figura 6. Variaciones de voltaje e intensidad de gran amplitud.

Gráficamente la resistencia promedio se corresponde con la pendiente de la cuerda trazada sobre la curva del elemento entre los valores extremos de excursión del voltaje y la intensidad.

El trabajar con corrientes de alterna de gran amplitud sobre un elemento no óhmico provoca una distorsión en la forma de onda obtenida, esto hace que los valores de ΔI o ΔV deban ser medidos con un osciloscopio según que el generador sea de voltaje o corriente.

También esta distorsión puede introducir una componente de continua en el circuito⁷ la cual junto con la impedancia del generador de alterna produce un corrimiento del punto de trabajo, nuevamente regulamos el generador de continua hasta obtener el punto de trabajo original.

Esta componente de continua debida a la distorsión, no se manifiesta en el caso de variaciones de pequeña amplitud pues, justamente, lo que diferencia un caso de otro, es que, para considerar a las variaciones de pequeña amplitud, pueda considerarse al elemento como lineal en el rango de variación de la corriente.

Para realizar las medidas se empleó nuevamente el circuito de la figura 5 en el cual la intensidad de corriente en continua es 10 mA. Se reguló la amplitud del generador de alterna hasta obtener sobre el diodo⁸ $V_{pp} = \Delta V = 0,80$ V, esto es, una excursión de 0,40 V alrededor del punto de trabajo Q.

Las medidas se realizaron con un osciloscopio, los cálculos se muestran en el apéndice B. El resultado obtenido es:

$$R_{AV} = (50 \pm 9) \Omega \quad (21)$$

Para su determinación gráfica primero obtenemos los valores extremos

⁷ Ver Apéndice C.

⁸ V_{pp} es el voltaje pico a pico.

del voltaje de alterna sobre el diodo, recordando que $V_Q = 3,23 \text{ V}$ y tenemos una excursión de $0,40 \text{ V}$ alrededor del punto de trabajo:

$$V_{\text{máx}} = V_Q + V_p = 3,23 + 0,40 = 3,63 \text{ V} \quad (22)$$

$$V_{\text{mín}} = V_Q - V_p = 3,23 - 0,40 = 2,83 \text{ V} \quad (23)$$

Con estos valores marcamos los puntos correspondientes sobre la curva del LED (P, R) y trazamos la cuerda, figura 6. Teniendo en cuenta los valores de incertidumbre de los voltajes para dichos puntos ($0,04 \text{ V}$ y $0,05 \text{ V}$) tenemos para la variación de voltaje sobre la gráfica:

$$\Delta V = (0,8 \pm 0,1) \text{ V} \quad (24)$$

De la gráfica 6 obtenemos ΔI y estimamos su incertidumbre:

$$\Delta I = (17,5 \pm 0,5) \text{ mA} \quad (25)$$

Por lo tanto la resistencia promedio calculada a partir de la gráfica es:

$$\begin{aligned} R_{AV} &= \frac{\Delta V}{\Delta I} = \\ &= \frac{0,80}{17,5 \times 10^{-3}} = 45,7 \, \Omega \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \delta R_{AV} &= \left(\frac{0,1}{0,8} + \frac{0,5}{17,5} \right) \times \\ &\times 45,7 = 7,3 \, \Omega \end{aligned} \quad (27)$$

$$R_{AV} = (46 \pm 7) \, \Omega \quad (28)$$

Como se ve, nuevamente hay concordancia entre los valores obtenidos, ecuaciones (21) y (28).

D. Conclusión

Se han definido tres formas de calcular la resistencia de un elemento no óhmico correspondiente a diferentes circuitos en los cuales puede encontrarse dicho elemento. También se construyeron los circuitos antedichos y se realizaron las me-

didias correspondientes, las cuales permitieron comprobar la validez de las diferentes formas de calcular la resistencia.

Esto nos permite ahora conocer el comportamiento resistivo de un elemento no óhmico en función de las características del circuito en el cual se encuentra.

En el siguiente artículo se analizará un modelo para los diodos en función de los resultados obtenidos. Se verá que es posible construir un único modelo que funcione en circuitos de corriente continua, de alterna de pequeña amplitud y de alterna de gran amplitud con bastante exactitud.

También se estudiará, en diferentes circuitos, el comportamiento del filamento de una lámpara, elemento óhmico que presenta generalmente una gráfica $I = f(V)$ no lineal debido a no controlar su temperatura.

Apéndice A

Características del material, los instrumentos y el software.

1. El LED empleado es uno verde ($\lambda = 525 \text{ nm}$) de alto brillo de Kingbright L-7524VGC.
2. Las medidas se realizaron con multímetros digitales: Uni-T modelo UT60A, Nippon America modelo ST-9500TF y EZ modelo DM-311 y un osciloscopio Leader modelo LBO-310A.

Las incertidumbres de las medidas realizadas con los multímetros están dadas por la siguiente expresión:

Incertidumbre = **a** % (de la lectura) + **b** dígitos (de la apreciación)

Los siguientes datos se obtuvieron de los manuales de los instrumentos:

Tabla VI: Características de los instrumentos en continua

	Alcance	Apreciación	Incertidumbre
Amperímetro	4000 μ A	1 μ A	1 % + 2
	40 mA	0,01 mA	1,2 % + 3
Voltímetro	20 V	10 mV	1 % + 1

Las medidas de la intensidad de corriente se realizaron con el alcance 4000 μ A hasta $I = 2,00$ mA y las demás con el alcance de 40 mA. Todas las medidas de voltaje se realizaron con el alcance 20 V.

Tabla VI: Características de los instrumentos en alterna

	Alcance	Apreciación	Incertidumbre
Amperímetro	4000 μ A	1 μ A	1,5 % + 5
Voltímetro	2 V	1 mV	1,2 % + 3

- Para realizar la gráfica (Fig. 2) se empleó el programa «Graph» [3] el cual es de uso libre.
- Modelo del LED. En los diodos la función que relaciona la intensidad de corriente con el voltaje es [4]:

$$I = I_0 \times \left(e^{\frac{q_e \times V}{\eta \times K_B \times T}} - 1 \right) \quad (29)$$

Siendo:

I : La corriente que circula por el diodo.

I_0 : La corriente inversa de saturación (es la corriente que circula en polarización inversa).

q_e : La carga del electrón (tomada positiva).

V : Voltaje aplicado al diodo.

η : Factor de idealidad (depende del material y la tecnología empleada).

K_B : La constante de Boltzmann que vale $1,38 \times 10^{-23}$ J/K.

T : La temperatura de la unión en Kelvin.

En general, para valores del voltaje aplicado mayores a 0,60 V (lo cual es nuestro caso) puede despreciarse el término -1 del paréntesis quedando:

$$I = I_0 \times e^{\frac{q_e \times V}{\eta \times K_B \times T}} \quad (30)$$

Teniendo en cuenta la resistencia serie propia del semiconductor [4] nos queda:

$$I = I_0 \times e^{\frac{q_e \times (V - r \times I)}{\eta \times K_B \times T}} \quad (31)$$

Trabajando a temperatura constante:

$$I = I_0 \times e^{K \times (V - r \times I)} \quad (32)$$

Expresando el voltaje en función de la intensidad de corriente nos queda:

$$V = \frac{1}{K'} \times \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) + r \times I \quad (33)$$

Para la regresión:

$$V = A \times \ln(B \times I) + C \times I \quad (34)$$

Siendo A , B y C constantes del modelo empleado.

La curva obtenida en la figura 2 tiene un coeficiente de determinación $R^2 = 0,9985$, lo cual muestra que los valores experimentales se ajustan muy bien al modelo y por lo tanto la curva trazada es muy precisa.

Apéndice B

Algunos cálculos

- Pendiente de la tangente.** Se muestra el procedimiento empleado para determinar la pendiente

de la tangente con su incertidumbre. Si bien el software empleado Graph, nos da la ecuación de la tangente trazada y por tanto el valor de la pendiente:

$$V = 44 \times I + 2,794$$

(pend = $44 \, \Omega$) (35)

No nos da el valor de la incertidumbre, por ello se realizó el siguiente procedimiento:

a. A partir de las incertidumbres en las medidas de voltaje e intensidad, se trazó la curva de mayor pendiente y la de menor pendiente en $I = 10 \, \text{mA}$ respetando el modelo de la regresión.

b. Para cada una de estas curvas se trazó la tangente en $I = 10 \, \text{mA}$, obteniéndose así la tangente de mayor pendiente y la de menor pendiente (Fig. 7).

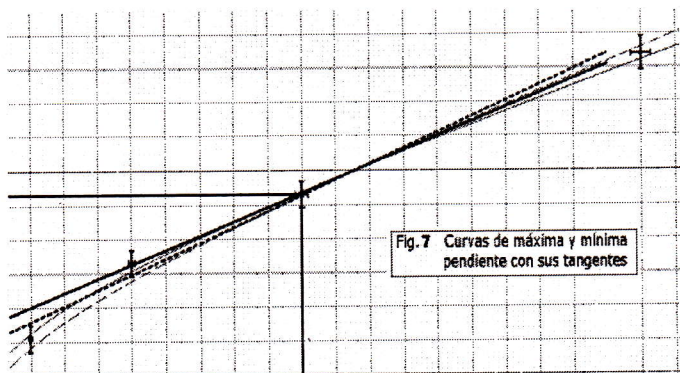


Figura 7. Curvas de máxima y mínima pendiente con sus tangentes.

c. Con estas dos pendientes se obtuvieron las cotas de la resistencia: $R_{\min} = 41,6 \, \Omega$ y $R_{\max} = 46,1 \, \Omega$ (valores dados por el software).

Lo cual nos da una R media:

$$\bar{R} = \frac{R_{\min} + R_{\max}}{2} = \frac{41,6 + 46,1}{2} = 43,85 \, \Omega \quad (36)$$

Y una incertidumbre:

$$\delta R = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{2} = \frac{46,1 - 41,6}{2} = 2,25 \, \Omega \quad (37)$$

Finalmente:

$$R = (44 \pm 2) \, \Omega \quad (38)$$

2. Resistencia promedio a partir de las medidas realizadas con un osciloscopio.

Se reguló la amplitud del generador de alterna hasta obtener sobre el diodo $V_{pp} = \Delta V = 0,80 \, \text{V}$. Esta medida se realizó con un osciloscopio el cual se calibró a $(1,00 \pm 0,02) \, \text{V}$ a plena escala vertical, lo cual nos da $(0,100 \pm 0,002) \, \text{V/Div}^9$ en el eje vertical. En la figura 8 se recrea la pantalla del osciloscopio para la medida anterior. Suponiendo, en la

lectura realizada por el observador, una incertidumbre de una división (de las pequeñas) del eje vertical de la cuadrícula ($0,02 \, \text{V}$), y teniendo en cuenta la incertidumbre de la calibración ($0,002 \, \text{V/Div} \times 8 \, \text{Div}$), la medida antedicha con su incertidumbre es:

$$\Delta V = (0,80 \pm 0,04) \, \text{V} \quad (39)$$

La intensidad de corriente se calculó midiendo en

el osciloscopio el voltaje pico a pico sobre una resistencia¹⁰ $R' = (47 \pm 2) \, \Omega$, el cual dio $V' = (0,76 \pm 0,04) \, \text{V}$.

Por lo tanto la intensidad es:

$$I_{pp} = \frac{V'}{R'} = \frac{0,76}{47} = 16,2 \, \text{mA} \quad (40)$$

⁹ Las divisiones de la calibración (Div) corresponden a los cuadrados de la cuadrícula de la pantalla.

¹⁰ $R=988 \, \Omega$ se formó con dos resistores en serie, uno de ellos de $47 \, \Omega$ y el otro variable.

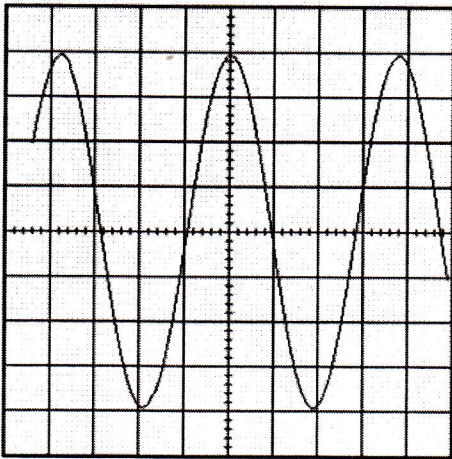


Figura 8. Pantalla del osciloscopio.

$$\begin{aligned} \delta I_{pp} &= \left(\frac{\delta V'}{V'} + \frac{\delta R'}{R'} \right) \times I_{pp} = \\ &= \left(\frac{0,04}{0,76} + \frac{2}{47} \right) \times 16,2 = (41) \\ &= 1,54 \text{ mA} \end{aligned}$$

$$I_{pp} = \Delta I = (16 \pm 2) \text{ mA} \quad (42)$$

Ahora podemos calcular la resistencia promedio a partir de las medidas realizadas:

$$R_{AV} = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{0,80}{16 \times 10^{-3}} = 50 \Omega \quad (43)$$

$$\begin{aligned} \delta R_{AV} &= \left(\frac{0,04}{0,80} + \frac{2}{16} \right) \times 50 = \\ &= 8,75 \Omega \end{aligned} \quad (44)$$

$$R_{AV} = (50 \pm 9) \Omega \quad (45)$$

Apéndice C

Desarrollo en serie de Fourier

[5]. Una función periódica $f(t)$ de frecuencia angular ω y período T , puede ser representada por una serie de términos senoidales y cosenoidales de la forma:

$$\begin{aligned} f(t) &= a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + \\ &+ \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega t) \end{aligned} \quad (46)$$

Siendo:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \cdot dt \quad (47)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \cos(n\omega t) \cdot dt \quad (48)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \sin(n\omega t) \cdot dt \quad (49)$$

El término a_0 , por su definición, es el valor medio de la función y es constante (independiente del tiempo). Para el caso que la función $f(t)$ represente una magnitud eléctrica (voltaje o intensidad de corriente), el término a_0 corresponde a la componente de continua de esa magnitud.

En caso que la función $f(t)$ sea simétrica respecto al eje de abscisas, su valor medio, a_0 , es cero. Para el caso de una magnitud eléctrica diremos que su componente de continua es cero.

En el caso que $f(t)$ no sea simétrica, su valor medio no es cero. Para el caso de una magnitud eléctrica originalmente simétrica, distorsionada por un elemento no lineal, su valor medio es generalmente distinto de cero y por lo tanto esta distorsión origina una componente de continua respecto de la función $f(t)$ original.

Referencias

- [1] Ohm, Georg Simon. *Die galvanische Kette, mathematische bearbeitet*. Berlín, 1827. Traducido al inglés por William Francis, New York: D. Van Nostrand Company, 1891. Kraus Reprint Co.: New York 1969.

Disponible en: <http://www.archive.org/details/galvaniccircuit00lockgoog>, consultado el 3/4/2010.

- [2] Boylestad, Robert y Nashelsky, Louis. *Electronic devices and circuit theory*. 5ª Ed. Traducido al español por Efrén Alatorre Miguel, México: Prentice Hall Hispanoamericana S.A., 1994.

- [3] Graph 4.3 Agosto 2009, <http://www.padowan.dk>, consultado el 3/4/2010.

- [4] Schubert E. Fred. *Light-Emitting Diodes*, 2ª Ed., Cambridge University Press, New York, 2006.

- [5] Feynman R., Leighton R. y Sands M. *Feynman Lectures on Physics*, Volume 1, 6ª Ed., Addison Wesley Longman, 1977.

...

RECOMENDACIÓN WEB 2

WEB

<http://www.scielo.org>

<http://www.scielo.br>

<http://www.scielo.edu.uy>

La Scientific Electronic Library Online (SciELO) es una biblioteca virtual que abarca una colección seleccionada de revistas científicas en todas las áreas del conocimiento.



La biblioteca es el resultado de un proyecto de investigación de la FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) en colaboración con BIREME (Centro Latinoamericano y del Caribe de Información en Ciencias de la Salud). A partir de 2002, el Proyecto cuenta con el apoyo del CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico).

El proyecto contempla el desarrollo de una metodología común para la preparación, almacenamiento, disseminación y evaluación de literatura científica en formato electrónico.

En la actualidad participan en la red SciELO ocho países: Argentina, Brasil, Chile, Colombia, Cuba, España, Portugal y Venezuela, y los sitios SciELO en Ciencias Sociales y Salud Pública. Existen iniciativas en desarrollo de otros cinco países: Costa Rica, México, Paraguay, Perú y Uruguay.

En la mayoría de los países el material científico está fuertemente orientado a las Ciencias de la Salud excepto en Brasil, en donde se accede a publicaciones de un gran número de áreas del conocimiento.

En especial podemos acceder gratis al «Brazilian Journal of Physics» (está en inglés) y a la «Revista Brasileira de Ensino de Física».



...

RESEÑA DE LIBROS

Mario Román Guerra Zabala

Universidad Católica del Uruguay - Facultad de Ingeniería y Tecnologías
Montevideo, Uruguay; e-mail: marioroman.guerra@gmail.com

Reseña

Reseña I

Título: «Las carencias de la Realidad»

Sub-título: «La conciencia, el Universo y la mecánica cuántica»

Autor: Ramón Lapiedra

Idioma: Español

Editorial: «Tusquets Editores»-
Colección «Metatemas» (101)

Edición: 1ª. de enero del 2008.

Es sabido que conjuntamente con la Teoría de la Relatividad, la Mecánica Cuántica constituye una teoría característica y representativa del pensamiento científico del siglo XX. Con características propias y absolutamente particulares, la teoría cuántica pretende dar una visión general de la estructura de la materia y las leyes fundamentales de la naturaleza, en una escala microscópica.

Un aspecto distinguido de la teoría, es su clara colisión con las afirmaciones y conceptos tradicionales acerca del determinismo, la causalidad así como la interpretación fenomenológica ingenua del mundo. Surgen en el análisis de la Mecánica Cuántica, dificultades del lenguaje clásico, que sin duda se presenta como limitado e impreciso, para las pretendidas descripciones del Universo. Tal vez esta sea la característica más apasionante de la nueva concepción, que se revela como una profunda revisión de cuestiones tan afirmadas en nuestra concepción del mundo como la separación «objeto- sujeto», el significado de la «realidad» y las soluciones que ofrece la teoría a todos estas com-

plejas cuestiones que ocupan y ocuparon a las mentes más prominentes de la Humanidad, durante siglos.

Muchos de los problemas que se plantearon los físicos positivistas presocráticos, siguen en pie, con nuevas interpretaciones. Y aunque dichos problemas no han sido resueltos y ni siquiera sepamos si tiene alguna solución definitiva, la Mecánica Cuántica ofrece nuevos caminos de indagación y al mismo tiempo una pléyade de conclusiones que han permitido el avance en el conocimiento y la tecnología de los últimos 100 años.

En esta obra que recomendamos con especial énfasis, el Profesor Dr. Ramón Lapiedra, un destacado docente valenciano nacido en 1940 nos ofrece, a partir de su vastísima experiencia (que es doctor en Física Teórica por las Universidades de París (1969) y de Barcelona (1974)) un resumen de sus conclusiones de alta calidad para los lectores.

Se trata de una obra que no incluye formalismo matemático. Sin embargo, aborda con éxito señalado un conjunto de explicaciones conceptuales que no pierden su profundidad ni precisión por el motivo anteriormente indicado, aunque la lectura implique en muchas oportunidades un esfuerzo de atención por parte del lector.

Reseña II

Título: «Galileo Heretic» (Galileo Herético)

Autor: Pietro Redondi (Translated by Raymond Rosenthal)

Idioma: Inglés

Editorial: Princeto University Press, Princeton, New Jersey

Edición: 1987

Sobre el conflicto planteado entre Galileo Galilei y la Inquisición, numerosos y renombrados especialistas han escrito abundantes artículos y libros. Generalmente, el conflicto se ha interpretado desde posiciones previamente sustentadas, tanto en lo filosófico como lo político, por distintos autores, lo cual no ha arrojado luz suficiente sobre la tragedia galileana.

En 1982, la historia de la confrontación tomó nuevo perfil, a partir de datos desconocidos hasta ese entonces y que revelaron la *profundidad del enfrentamiento* y las razones por las cuales el mismo se produjo. Razones que van mucho más allá de la simple discusión, como generalmente se plantea, acerca de la posición copernicana de Galileo.

Es sabido, que la obra galileana ha sido profundamente revisada con extraordinaria precisión y documentación probatoria, por diversos autores (Alexander Koyré por mencionar uno de los más destacados). Es esa revisión la que ha arrojado nuevos e importantes datos, que nunca se tomaron en consideración, en las versiones más difundidas de la peripecia galileana. Esta información desplaza el centro de la discusión desde el conocido centro cosmológico a un punto donde este aspecto es solamente «satelital».

Las razones de fondo del conflicto, de acuerdo con las actas y documentos del juicio al que fuera sometido Galileo, se hallan en determinados

escritos («documento G8» entre ellos) que no fueran desclasificados hasta la fecha anteriormente señalada, por el entonces Presidente de la Sagrada Congregación para la Doctrina de la Fe, Cardenal Joseph Ratzinger.

En la mencionada oportunidad, se le permitió al periodista e historiador de la ciencia Pietro Redondi, la consulta directa en la Biblioteca Vaticana, de algunos pormenores fundamentales del conflicto y que explican las razones por las cuales contemporáneos de Galileo simpatizantes con el sistema de Copérnico (la inmensa mayoría astrónomos jesuitas y hasta el propio Kepler alineado con la Iglesia de la Reforma) no fueron condenados por esa misma causa. ¿Qué había de particular en las afirmaciones de Galileo y sus escritos que generaron tanta irritación? ¿Cuál es la obra de Galileo que tiene mayor peso en su contra en los sucesos ocurridos? ¿Solamente fueron intrigas (que las hubo) las que decidieron la suerte de Galileo? ¿Por qué el principal teólogo de la época galileana, el jesuita Dr. Roberto Bellarmino, que fue su interlocutor de mayor relevancia según la «historia oficial», fue postergado más de 50 años para su canonización?

Todas estas preguntas, son indagadas por el autor, en un cuidadoso trabajo, muy documentado, preciso y de notoria objetividad. Por estas razones, estimamos que el libro de Pietro Redondi, es una lectura altamente recomendable y que una vez más reafirma la conocida opinión de que en Ciencia y en Historia de la Ciencia, los simplismos y reduccionismos contundentes, generalmente son erróneos.

...

EDUCACIÓN en FÍSICA

Revista de la Asociación de Profesores de Física del Uruguay
Volumen 9 Número 9

Agosto, 2010

CONTENIDO

12 tras 19 (a modo de Editorial)	1
MECÁNICA CUÁNTICA	
Una teoría física revolucionaria <i>Mario Román Guerra Zabala</i>	3
RECOMENDACIÓN WEB 1	20
BALANZA DE COTTON	
<i>Guzmán Trinidad, Daniel Bacchino</i>	21
OLIMPIADA IBEROAMERICANA DE FÍSICA	
<i>Andrea Cabot, Pablo García</i>	29
PROPUESTA DE UTILIZACIÓN DE INTERNET PARA LABORATORIOS REMOTOS EN LA ENSEÑANZA DE CIRCUITOS ELÉCTRICOS EN CARRERAS DE INGENIERÍA	
<i>Cecilia Culzoni, Hugo Kofman, Pablo Lucero, Rubén Monje</i>	31
SITUACIONES PROBLEMÁTICAS EN FÍSICA (I)	
<i>Carlos Zalmavide</i>	38
MEDIDAS DE RESISTENCIA EN CONDUCTORES NO ÓHMICOS (I)	
<i>Fernando Fontán Bartibás</i>	40
RECOMENDACIÓN WEB 2	50
RESEÑA DE LIBROS	
<i>Mario Román Guerra Zabala</i>	51