

# ***Física. Ondas electromagnéticas***

**4**

***Especialistas en contenidos:***

- Rosa Adam
- Rosana Aristegui
- Agustín Rela
- Jorge Sztrajman

***Director científico:***

- Alberto Maiztegui

**serie/ciencias para la educación tecnológica**

---

1. Análisis matemático. Sus aplicaciones.
2. Física. Interacciones a distancia
3. Física. El campo magnético
4. Física. Ondas electromagnéticas.



## Índice

---

La serie “Ciencias para la Educación Tecnológica”	9
Introducción a “Ondas electromagnéticas”	11
Primera sección	
• Corrientes de desplazamiento y circuitos RC	17
Segunda sección. Apoyando la práctica experimental	
• La experiencia de Oersted	29
• Las experiencias de Faraday	30
• La ley de Faraday	34
Tercera sección	
• Flujo e inducción	41
• Definición de B	42
• El generador	46
• La necesidad de las ondas	51
Cuarta sección	
• Producción de ondas electromagnéticas	55
Quinta sección	
• El espectro electromagnético	75
En pocas palabras	81
Clave de respuestas	85
Apéndice. Ideas y elementos para realizar las actividades	
• Producción de un campo magnético con una corriente	97
• Producción de una corriente eléctrica a partir de un campo magnético	99
• Producción de una corriente eléctrica a partir de otra corriente eléctrica	101
• Producción de ondas electromagnéticas	103
• El multímetro	104
Bibliografía	107



## ***La serie “Ciencias para la Educación Tecnológica”***

Con el título ***Ciencias para la Educación Tecnológica***, estamos planteando desde el CeNET una serie de publicaciones que convergen en el objetivo de:

Acompañar a nuestros colegas docentes en la adquisición de contenidos científicos que les permitan una mejor definición, encuadre y resolución de los problemas tecnológicos que se enseñan en la escuela.

Porque, en Educación Tecnológica, las ciencias básicas ocupan “una posición importante aunque subalterna e instrumental (...) La tecnología es un modo de ver el fenómeno de la artificialidad, y de analizar ‘sistémicamente’ los objetos tecnológicos desde su finalidad y no desde los fundamentos científicos en que se basa su funcionamiento.” (Ministerio de Cultura y Educación de la Nación. Consejo Federal de Cultura y Educación. Contenidos Básicos Comunes para la Formación Docente de Grado. Tercer Ciclo de la Educación General Básica y Educación Polimodal. “Contenidos Básicos Comunes del Campo de la Formación de Orientación de la Formación Docente de Educación Tecnológica”. Buenos Aires.)<sup>1</sup>

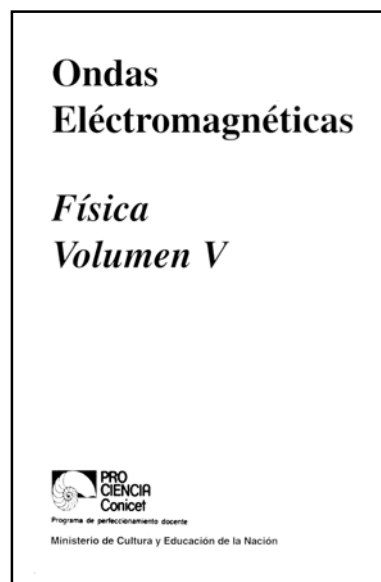
**Física. Ondas electromagnéticas**, el material que usted tiene en sus manos es una versión digital de la publicación del mismo nombre que, en 1994, elaboró el Programa de Perfeccionamiento Docente Prociencia-CONICET<sup>2</sup>, del Ministerio de Cultura y Educación de la Nación Argentina y que desde el CeNET nos proponemos continuar distribuyendo<sup>3</sup>.

### **Objetivo general:**

- Interpretar la propagación de la energía electromagnética a través del concepto de onda.

### **Objetivos específicos:**

- Explicar algunos métodos que permitan detectar la presencia de ondas electromagnéticas.
- Diseñar experiencias destinadas a producir ondas electromagnéticas.
- Resolver algunos problemas de electromagnetismo, para ejemplificar conceptos y leyes.
- Interpretar el comportamiento de un dieléctrico, a través del concepto de corriente de desplazamiento.
- Planificar actividades experimentales sobre electromagnetismo.



<sup>1</sup> Puede usted encontrar la versión completa en el sitio web del Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología; específicamente, en la página:

-<http://www.me.gov.ar/curriform/servicios/publica/publica/fordoc/index.html>

<sup>2</sup> El CONICET es el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, de la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva –Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología–.

<sup>3</sup> La versión de este libro en soporte papel corresponde al ISBN 950-692-024-9





## **Introducción a “Ondas electromagnéticas”**

Si tratamos de mirar el mundo con cierto espíritu investigador, probablemente nos encontremos, a nuestro alrededor, con situaciones que no por cotidianas dejan de ser sorprendentes.

Nos referimos, por ejemplo, al hecho de poder mantener una comunicación telefónica a gran distancia, vía satélite (Si alguna vez mantuvo una, ¿se preguntó por qué se produce ese retraso de más de medio segundo en la respuesta?) o, aunque no parezca tener relación con lo anterior, ver cómo se cocinan los alimentos en un horno a microondas (sin hornallas, ni resistencias eléctricas, ni carbón).

Y, ¿no es lícito, también, asombrarse cuando sintonizamos, en un receptor de radio, una emisora que transmite informaciones sobre el mundo entero o cuando nos describen el descenso de un gran avión, cargado de pasajeros, “a ciegas”, guiado por la torre del control del aeropuerto y por su equipo de radar?

Para nosotros, lo realmente interesante de estos fenómenos y de otros varios que describiremos oportunamente, es que tienen un denominador común: en todos ellos hay propagación de lo que llamaremos ondas electromagnéticas, concepto al que dedicaremos la mayor parte de este módulo.

- ¿Cómo es posible que un puesto de radio se comunique con otro sin que los una ningún cable ni otro medio?
- ¿Cuál es el mecanismo que permite la recepción de una emisión de radio, televisión o radar?
- ¿Qué es lo que viaja por el espacio, desde la emisora hasta el receptor?
- ¿Cómo se producen los sonidos o las imágenes que se perciben?
- ¿Cómo se realiza el llamado “vuelo por instrumental”?
- ¿Cómo se guía un avión en medio de la niebla?
- ¿Cualquier onda de radio llega al “mundo entero”?

¿Cómo responder a estas preguntas?

Si bien suponemos que usted ya está familiarizado con nuestro modo de trabajo, reiteramos las propuestas que planteamos en los cursos anteriores:

- a) Revise los temas relativos a electromagnetismo en los textos recomendados en la bibliografía de este módulo (No olvide que la consulta bibliográfica realizada en forma crítica y sistemática constituye un ítem fundamental en el proceso de mejoramiento de la enseñanza de la ciencia).
- b) Por razones metodológicas que hacen a la transferencia y por la importancia que tienen en la teoría electromagnética, le proponemos el análisis de los siguientes temas:
  - Corrientes de desplazamiento.
  - Ley de inducción de Faraday.
  - Producción de ondas electromagnéticas.

### **La experimentación**

Queremos incrementar la práctica experimental de nuestros alumnos. En general, los jóvenes muestran interés por temas vinculados con el electromagnetismo; pero, el uso de material puede ser complicado o peligroso. Creemos que lo importante es brindarles seguridad en su manejo.

Por eso, en la cuarta sección de este módulo, le proponemos un conjunto de experiencias particularmente sencillas.

No necesariamente los laboratorios escolares de física requieren elementos de alto costo. Depende de nuestro interés y de nuestro ingenio diseñar experiencias que no exijan material costoso y con las que podamos alcanzar los mismos objetivos que hubiéramos logrado usando elementos de precio más elevado.

Al respecto, queremos transcribirle el texto de Josep Estalella que refleja extraordinariamente las posibilidades para la observación de fenómenos físicos que se nos presentan a diario:

“Salvo rarísimas excepciones, cuantos aparatos se han construido y se construyen con destino a ‘la enseñanza’ de la física, adolecen del mismo error fundamental: sustituir lo natural por lo artificial, lo usual por lo extraño, y determinar, junto con los libros en que tales instrumentos se describen, el mismo pernicioso efecto: Desorientar al maestro respecto de cómo debe estudiarse física.

(...) Hablábame, no hace mucho, el padre que llevaba a su hijo, estudiante de bachillerato, a examinar en el Instituto de la capital de provincia, de la manera cómo se podían seguir los cursos en el pueblo; habíase encargado de los estudiantes el maestro, persona muy culta que realizaba una excelente labor.

*Y así continuará mi hijo –decíame el padre– hasta el quinto curso, pues como entonces tendrá que estudiar física y en el pueblo no tenemos aparatos...*

*¿Cómo? –interrumpí– ¿Qué queréis decir con estas palabras: ‘En el pueblo no tenemos aparatos’? Pues, ¿no tiene yunque y fragua el herrero, balanzas el panadero, niveles y plomadas el albañil, sierras el carpintero, arados el labrador? ¿No tienen cerraduras las puertas, vigas las casas, arcos los puentes, cuevas los caminos?*

¿No hay norias en las acequias, bombas en las cisternas, porrón en la mesa, regaderas en el jardín, poleas en los pozos, regueras en los huertos, grifos en las fuentes, sifones en las tuberías, aliviaderos en los estanques, surtidores en los patios? ¿No juegan con cometas los niños? ¿No elevan aerostatos de papel en las grandes fiestas? ¿Y los fueles? ¿Y las botellas de agua carbónica? ¿Y los lugares que se llenan de gas carbónico? El médico empleará termómetro, las ladrillerías encenderán el horno, en la hojalatería fundirán metales; tendréis pianos en los salones, órgano en las iglesias, campanas en el campanario, espejos en los tocadores; muchas personas usarán lentes; llevaréis gemelos al teatro; habrá quizás algún fotógrafo profesional y, seguramente, decenas de aficionados; os recrearéis los domingos con proyecciones cinematográficas. Y, de electricidad, ¿qué diré? Que en vuestros domicilios hay contadores, interruptores, conmutadores, cortacircuitos, lámparas, timbres eléctricos, pilas, pulsadores, pararrayos, teléfono, micrófono. Más... ¿y esa máquina de coser, con sus mecanismos de increíble perfección? ¿Y ese gramófono del vecino? ¿Y esa estufa y esa chimenea de tan buen tiro? ¿Y el automóvil en que habéis venido? ¿Y las bicicletas? ¿Y los cuchillos, los sacacorchos, y las tijeras y las tenacillas? ¿Y los relojes de pared y de bolsillo? ¿Y toda esa juguetería infantil de pitos, aros, pelotas, trompos, panderetas, diábolos? ¿Y, en la central eléctrica, ¿no os van a permitir una visita? ¿Y en tal taller y en tal fábrica con sus motores de gas, sus máquinas de vapor, sus turbinas hidráulicas? Y el telegrafista también os mostrará los aparatos de su estación. ¿Y no habrá al-

gún aficionado a la meteorología con su instalación de barómetros, termómetros, psicrómetros, pluviómetros, anemómetros, veleta? ¿Y no existirá ya a estas horas una turba de poseedores de estaciones radiotelefónicas, con sus detectores, amplificadores, condensadores, bobinas, etcétera, etcétera? Convergamos, amigo mío, en que ningún gabinete puede ofrecer tan nutrida provisión de aparatos como tu mismo pueblo.

Cien veces más he tenido que dar análoga contestación a padres, profesores y estudiantes que, alegando falta de aparatos, creían justificar el haber limitado a lecturas el estudio de la física. Y, tan claras como eran mis indicaciones, aun me veía obligado a insistir para empezar a convencerles de que no había más, y de lo que ellos llamaban especialmente 'aparatos de física' no tenían, sobre los enumerados, más que el empaque, el convencionalismo, la inutilidad."



Curioso grabado tomado de *Recreaciones científicas* de Gastón Tissandier (1981. Alta Fulla. Barcelona), cuyo espíritu y época coinciden con los de Estalella.

Antes de comenzar la revisión de los temas propuestos, revisión que nos ayudará a encarar en el aula las posibles preguntas que nuestros alumnos planteen, lo invitamos a reflexionar sobre la historia del electromagnetismo.

*El tic-tac de un reloj oído desde el extremo de unas tenazas de chimenea*

### Un poco de historia

Las interacciones entre los campos eléctricos y magnéticos habían interesado a los físicos del siglo XIX. Los trabajos de Ohm, Ampere, Oersted y Faraday, fundamentales para la comprensión de los fenómenos de base, constituyeron el pilar sobre el cual se construyó uno de los andamiajes más elegantes y amplios para describir todo lo conocido sobre la luz, la electricidad y el magnetismo, en el orden macroscópico. Esta "síntesis electromagnética", que reunió y comprendió todas las leyes antes conocidas, junto con la mecánica de Newton, componen la llamada **física clásica** que, si bien no resulta adecuada en la escala atómica o subatómica, es una de las descripciones más poderosas y fecundas de la naturaleza que nos rodea.

El constructor de este edificio científico fue James Clerk Maxwell, que nació en Edimburgo, Escocia, en 1831, año en el que Faraday anunciaba sus descubrimientos sobre la inducción electromagnética. Maxwell analizó cuidadosamente la obra de Faraday, produciendo finalmente, en 1873, su fundamental *Tratado de electricidad y magnetismo*, donde presenta su **teoría electromagnética**.

Si bien Faraday fue el primero en elaborar el concepto de campo para explicar casi todos los fenómenos electromagnéticos conocidos en su época, era necesario que

esa concepción fuera traducida al lenguaje matemático; ello fue realizado por el más grande físico teórico del siglo pasado: Maxwell. Su obra no concluye en esta traducción, aunque esto ya hubiera sido suficiente para reconocerle un lugar destacado en la historia de la física. Lo verdaderamente importante y genial de Maxwell es haber deducido, como corolario matemático de las ecuaciones que llevan su nombre, la existencia de la onda electromagnética como forma de propagación de la perturbación electromagnética.

El físico alemán Heinrich Hertz, en 1887, pudo verificar experimentalmente la existencia de tales ondas y, además, estudiar sus propiedades.

“La **predicción teórica** de la existencia de las ondas electromagnéticas realizada por Maxwell, causó el primer revuelo en la física teórica desde que Laverrier y Adams (1846) obtuvieron su famoso resultado por deducción teórica. Del instrumento auxiliar para el cálculo y la formulación que era la matemática hasta Newton, se había convertido –a partir de la obra de éste– en un poderoso método heurístico, que permite prever el hecho y hasta sugerir su existencia. Aunque, desde luego, su justificación esté siempre decidida por la experiencia, tribunal en primera y última instancia.”<sup>4</sup>

La otra gran contribución de Maxwell fue la hipótesis de que la luz es también una onda electromagnética. Ello significa un nuevo paso hacia la unificación de los diferentes dominios de la física; en este caso, se sintetizaban dos campos aparentemente sin vinculación alguna: el electromagnetismo y la óptica.

Es interesante especular acerca de cómo se sintió Maxwell con su descubrimiento o en qué momento, exactamente, concibió a la luz como una onda electromagnética. Probablemente, el detallado estudio de las relaciones entre las variaciones de los campos magnéticos y eléctricos, y sus influencias mutuas lo haya llevado a la conclusión de que *tenían* que existir ondas electromagnéticas. De existir realmente, ¿a qué velocidad debía propagarse?

Esto lo pudo calcular Maxwell. La velocidad de propagación era  $\frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}}$ , donde  $\mu$  es la permeabilidad y  $\epsilon$  la permitividad o constante dieléctrica del medio. Para el

vacío es  $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \cong 300.000 \text{ Km / s.}$

La sorpresa debió ser mayúscula pues el valor resultaba, en su época, muy familiar: era la velocidad de la luz.

Mientras Maxwell especulaba sobre la existencia de las ondas electromagnéticas, se iluminaba con ellas.

Creemos conveniente que usted recomiende a sus alumnos la lectura de *Faraday, Maxwell y Kelvin*, de D. K. C. Mac Donald, publicado por EUDEBA, Editorial Universitaria de Buenos Aires, en su colección “Ciencia Joven”. Podrán lograr un perfil, no solamente científico sino también humano, de estos pilares de la ciencia.

<sup>4</sup> Bunge, Mario (1943) “Significado físico e histórico de la teoría de Maxwell”. Conferencia pronunciada en la Universidad Nacional del Litoral. Se refiere al descubrimiento del planeta Neptuno por Leverrier y Adams.

## ***PRIMERA SECCIÓN***

---

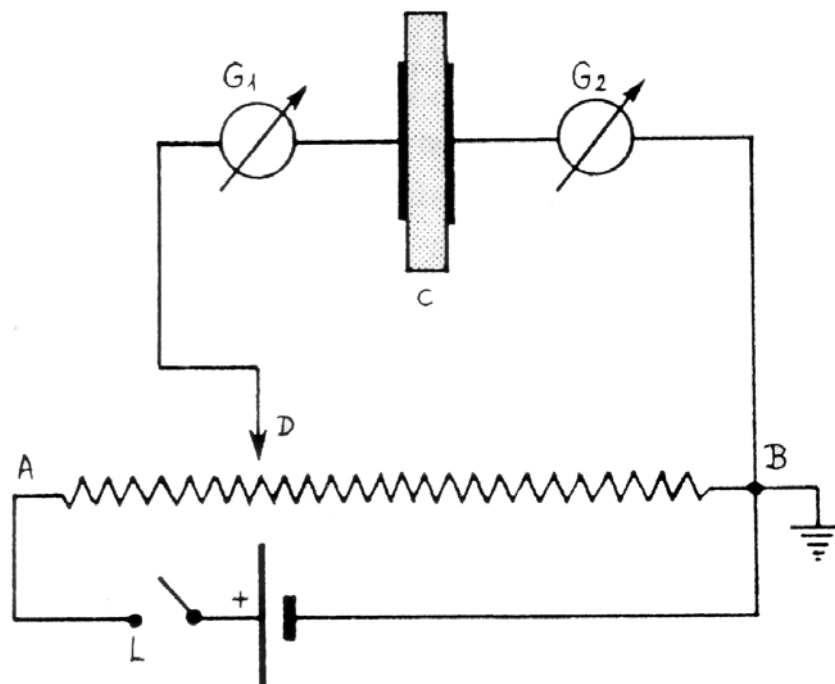


Tal como lo adelantamos en la introducción, nos ocuparemos de dos temas vinculados con los trabajos de Maxwell.

### **Corrientes de desplazamiento y circuitos RC**

Una de las mayores contribuciones de Maxwell fue la concepción de las llamadas corrientes de desplazamiento. Se trata de corrientes eléctricas que pueden existir aún en el vacío y que están asociadas a la existencia de campos magnéticos (efecto Oersted) como lo está cualquier corriente eléctrica de conducción.

Consideremos este circuito eléctrico:



Una batería es conectada a un resistor (resistencia) AB; D es un contacto variable que permite establecer una derivación; los puntos D y B se unen –a través de los galvanómetros  $G_1$  y  $G_2$ – a las placas del condensador C.

El interruptor L debe estar inicialmente abierto y el contacto D debe encontrarse en el extremo B: el condensador está descargado. En estas condiciones:

- a) Se cierra el contacto L. ¿Qué se observa en los galvanómetros?

Respuesta: Las agujas respectivas quedan en reposo; no hay pasaje de cargas.

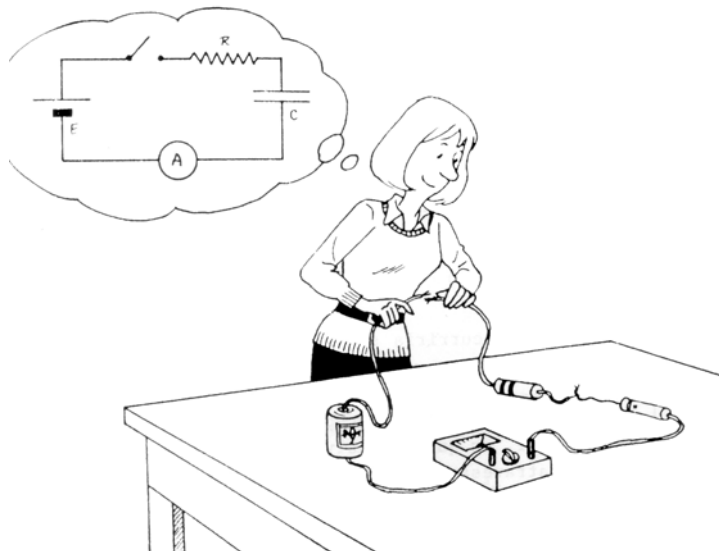
- b) Se mueve el contacto D, desde B hacia A; pero, poniendo atención en los galvanómetros (contacto L cerrado), ¿qué indican estos instrumentos?

Respuesta: Las agujas de los instrumentos se desvían señalando el pasaje de cargas eléctricas. Las agujas se desvían cada vez que se mueve el cursor. Cuando a éste se lo deja inmóvil, la corriente disminuye y, al cabo de un tiempo, resulta insignificante.

Por otra parte,  $G_1$  y  $G_2$  señalan el pasaje de corrientes de igual intensidad.

- c) Observe que, entre las armaduras del condensador, hay un dieléctrico. Con otras palabras: La derivación  $DG_1$  y  $G_2B$  está abierta en el condensador. Sin embargo, los galvanómetros acusan el pasaje de cargas. ¿Cómo explicar la existencia de esa corriente?

Respuesta: Imaginemos, a ese efecto, un caso más sencillo.



Se trata de una fuente de tensión –por ejemplo, una pila– que, mediante un interruptor, se conecta a un capacitor a través de una resistencia. Si se utilizan las relaciones  $C = Q/V$  e  $I = dQ/dt$ , resulta:

$$V + I.R = E$$

$$\frac{Q}{C} + I.R = E$$

$$\frac{Q}{C} + \frac{dQ}{dt}.R = E$$

$$\frac{Q}{RC} + \frac{dQ}{dt} = \frac{E}{R}$$

Se trata de hallar una función del tiempo  $Q(t)$  que satisfaga la ecuación recuadrada, que es una ecuación diferencial.

Si suponemos, como condición inicial, que el capacitor está, inicialmente, descargado, será  $Q(t=0)=0$  y la solución es:

$$Q(t) = C.E.(1 - e^{-t/RC})$$

Análogamente:

$$I(t) = \frac{E}{R}.e^{-t/RC}$$

$$V(t) = E(1 - e^{-t/RC})$$



**ACTIVIDAD 1**

Grafique las funciones  $Q(t)$ ,  $I(t)$  y  $V(t)$ .

**ACTIVIDAD 2**

Indique qué ocurriría si en el último circuito, idealmente, fuera  $R=0$  y se cerrase el interruptor.

En definitiva, lo que sucede al mover el cursor o al cerrar el interruptor es que los galvanómetros acusan el pasaje de cargas que, sin atravesar el dieléctrico, se acumulan en las placas del capacitor.

¿Qué interpretación dio Maxwell a los fenómenos que detallamos?

Si el condensador tiene capacidad eléctrica  $C$ , al aplicarle una diferencia de potencial  $V$ , aquél se cargará de forma tal que:

$$Q = C \cdot V$$

La carga variará con el tiempo; pero, alcanzará un valor de, aproximadamente, el 67% de su valor límite, luego de transcurrido un tiempo del orden del tiempo característico; éste es igual a un segundo para el caso de una resistencia de 1000 ohms y un condensador de 1000 microfaradios. Aunque, en teoría, jamás se alcanza el valor límite, transcurrido suficiente tiempo puede suponerse alcanzado, a los efectos prácticos.

Si las placas del condensador son planas y muy próximas entre sí con respecto a sus dimensiones, es:

$$V = E \cdot d$$

donde  $d$  es la distancia entre placas y  $E$  la intensidad del campo eléctrico uniforme que existe entre las armaduras; luego:

$$Q = C \cdot E \cdot d \quad (1)$$

**¿Qué letra usamos?**

Con frecuencia, se duda acerca de qué letra conviene usar para designar a la intensidad de campo eléctrico, para evitar confusiones con otras magnitudes. Usualmente, se emplea la  $E$  mayúscula, a pesar de que varios autores emplean la misma letra para la tensión eléctrica y otros para la energía.

Debemos abandonar la quimera de pretender que cada magnitud física tenga una letra que la represente y que le sea característica, porque no existen tantas letras diferentes como magnitudes físicas distintas. Frente a cada caso, la lectura comprensiva y encuadrada en su contexto deberá prevalecer sobre las normas difíciles de cumplir rigurosamente.

Si se mueve el cursor, se varía la diferencia de potencial entre placas y la carga de éstas varía en  $\Delta Q$ .

Es:

$$Q + \Delta Q = C \cdot (E + \Delta E) d \quad (2)$$

Restándole a la (2) la (1)

$$\Delta Q = C \cdot d \cdot \Delta E \quad (3)$$

Dividiendo los dos miembros de la (3) por  $\Delta t$  (intervalo en que se produjo la variación  $\Delta Q$  de la carga) resulta:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = C \cdot d \cdot \frac{\Delta E}{\Delta t}$$

Obsérvese que  $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$  es, precisamente, la intensidad de la corriente eléctrica de conducción por DC y por CB.

$$i_c = C \cdot d \cdot \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad (4)$$

y  $\frac{\Delta E}{\Delta t}$  es la rapidez de cambio del campo eléctrico entre las armaduras del condensador.

La experiencia muestra que, alrededor de los conductores por los que circula efectivamente la corriente eléctrica, aparece un campo magnético. Pero, *además* –y aquí está lo importante–:

La experiencia muestra también que, rodeando el dieléctrico del condensador, aparece un campo magnético, como si entre armaduras existiera una corriente de conducción que, en verdad, no hay.

Maxwell postuló que, para que se produzca el **campo magnético** (efecto Oersted), lo fundamental es que exista un **campo eléctrico** variable.

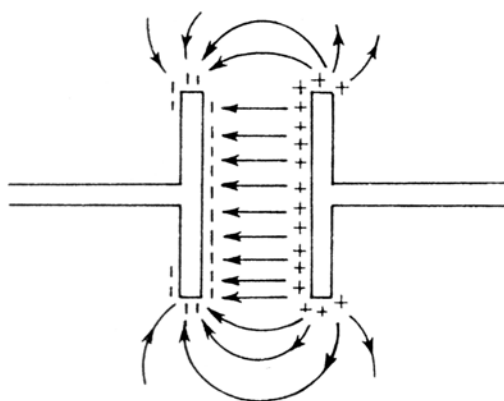
A este tipo de corriente –que no es producida por un transporte de cargas eléctricas sino por una variación del campo eléctrico– la llamó corriente de desplazamiento y la identificó con el segundo miembro de (4).

Entonces:

$$i_D = C \cdot d \cdot \frac{\Delta E}{\Delta t}$$

La corriente de desplazamiento  $i_D$  es directamente proporcional a la rapidez de cambio del campo eléctrico.

Con la aceptación de las corrientes de desplazamiento, podemos afirmar que todas las corrientes eléctricas son cerradas.



Campo eléctrico instantáneo en el condensador. En valor de  $E$ , en general, varía en cada punto, con el transcurso del tiempo.

### Problema 1

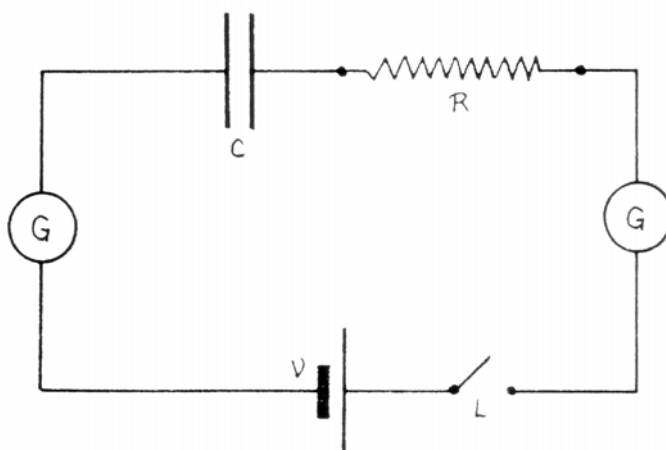
Un acumulador de 12 voltios se conecta en serie con una resistencia de  $12\Omega$ , un interruptor  $L$ , un condensador  $C$  de placas paralelas y dos galvanómetros  $G$ .

La resistencia interna de los galvanómetros y de la batería es despreciable y la capacidad del condensador es  $C = 100\mu\text{F}$ .

Se cierra el circuito mediante  $L$ .

- ¿Qué indican los galvanómetros?
- ¿Cuál es la intensidad de la corriente en el mismo instante en que se cierra el circuito?
- ¿En qué tiempo, aproximadamente, se anula la corriente?

- En el momento de cerrar el circuito comienza el desplazamiento de cargas eléctricas por los conductores del circuito. Esa corriente de conducción se continúa con una corriente de desplazamiento entre las placas del condensador.



Los dos galvanómetros indican valores de  $i$  iguales. A medida que el condensador es cargado, la intensidad de la corriente disminuye y, al cabo de un brevísimo intervalo de tiempo, se anula. Ello ocurre cuando la diferencia de potencial entre las armaduras del condensador iguala a la f.e.m. del acumulador; en tal caso, en cada punto de los conductores del circuito se equilibra el campo eléctrico creado por el generador con el campo creado por las cargas del condensador. En este estado final, la corriente vale cero y no hay caída de tensión en el resistor.

- b) En el instante de cerrarse la llave, las cargas comienzan a desplazarse por el circuito; en ese momento, la intensidad es máxima y, transcurrido algún tiempo, prácticamente se anula.

En el instante de cerrarse el circuito:

$$i = \frac{\text{f.e.m}}{R}$$

$$i = \frac{12\text{V}}{12\Omega}$$

$$i = 1\text{A}$$

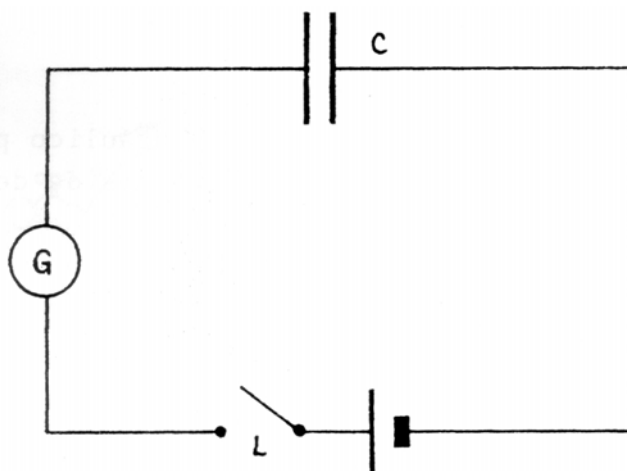
(Sólo en el instante inicial; pues, luego, decrece).

- c) La corriente disminuye exponencialmente en la misma forma en la que aumenta la carga y desciende a un valor  $1/e$  de su valor inicial, después de transcurrido un tiempo igual a la constante de tiempo  $RC$ . Como la carga del condensador se aproxima asintóticamente a su valor final, se requiere un tiempo infinito para que la corriente se anule. No obstante, desde un punto de vista práctico, suele hablarse del “tiempo de carga” (o de descarga) y se alude con ello no al tiempo infinito sino, meramente, a la constante de tiempo.

### ACTIVIDAD 3

Calcule cuánto tiempo tiene que transcurrir para que, en el circuito anterior, la corriente se reduzca a la millonésima parte de su valor inicial.

### ACTIVIDAD 4



Se tiene armado el circuito de la figura. Supongamos que la resistencia del circuito es muy reducida.

Cuando el contacto  $L$  se cierra, el condensador  $C$  se carga.

Durante el brevísimo intervalo que dura la carga de  $C$ , se determina que la intensidad de la corriente de conducción es, en cierto instante, igual a  $i_c = 50\text{ A}$ .

- 4.1. ¿Cuál es el valor de la intensidad de la corriente de **desplazamiento en el mismo instante**?
- 4.2. ¿Cuál es el valor de la rapidez de cambio de campo eléctrico **en ese mismo instante**? Suponer que el condensador es plano, con dieléctrico vacío, el valor de la capacidad  $C=4 \cdot 10^{-6} \text{ F}$  y la distancia entre placas  $d = 0,1 \text{ cm}$ .
- 4.3. ¿Qué cantidad de electricidad pasa a través del dieléctrico del condensador durante el intervalo de carga?

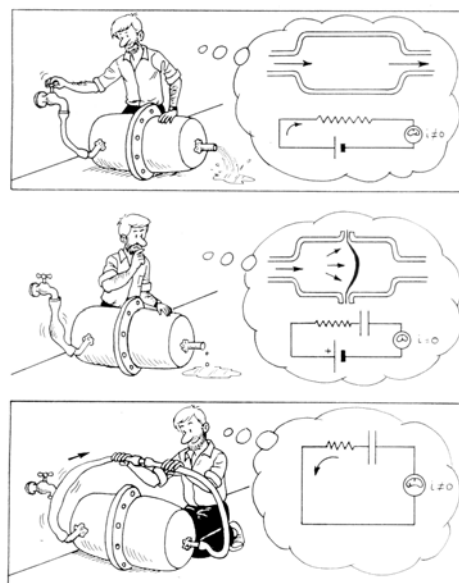
Es frecuente usar el símil hidráulico para explicar a los alumnos algunos conceptos sobre circuitos eléctricos. Se establece, así, una analogía entre la circulación de cargas por un conductor eléctrico y el movimiento de un fluido por tuberías o mangueras, entre mayor o menor resistencia eléctrica y angostamientos o ensanchamientos de tubos, etcétera. Creemos en la utilidad de estos modelos siempre que se adviertan claramente los límites de estas semejanzas. Por ejemplo: Atar un nudo a un conductor eléctrico no afecta el paso de la corriente eléctrica; pero, sí altera el movimiento de un fluido al anudar una manguera.

Sin embargo, el modelo hidráulico es una analogía muy poderosa ya que permite visualizar los mecanismos puestos en juego en los circuitos eléctricos, a través de ideas más familiares.

Le proponemos, por lo tanto, este modelo hidráulico para la carga y descarga de un condensador y las corrientes de desplazamiento:

Un recipiente tiene una membrana que divide en forma estanca sus mitades. La membrana es elástica y, cuando se introduce agua por un extremo, sale agua por el otro; pero, no se trata de la misma agua. Visto desde afuera, sin saber de la existencia de la membrana, se diría que hay circulación; pero, cada vez hay que hacer más presión para mantenerla. Finalmente, aunque se mantenga una presión constante, cesa toda circulación.

Similarmente, cuando se aplica una tensión eléctrica a los terminales de un condensador, parecería que durante un tiempo circulase corriente por dentro, hasta cesar aunque se mantenga aplicada la tensión eléctrica; el condensador completó su carga.



*El modelo hidráulico de la carga de un capacitor*

¿Qué sucede con la descarga? En el recipiente, cuando unimos ambas mangueras entre sí, gracias a la presión de la membrana, el agua circula por el tubo, sale de una cámara y penetra en la otra. En el capacitor, si se unen sus cables, circula corriente por ellos, debido a las cargas que salen de una placa y van a la otra.

Una membrana dura es análoga a un condensador de poca capacidad y una blanda a uno de mucha capacidad. Una membrana porosa se asemejaría, en este modelo, a un condensador con un dieléctrico en fuga.

A veces, durante la descarga de un condensador a través de resistencia muy reducida y siempre que exista suficiente inductancia, se observan oscilaciones. En el modelo hidráulico propuesto, ese efecto también ocurriría, si los tubos son gruesos y largos y el líquido muy poco viscoso, debido a los efectos de inercia.

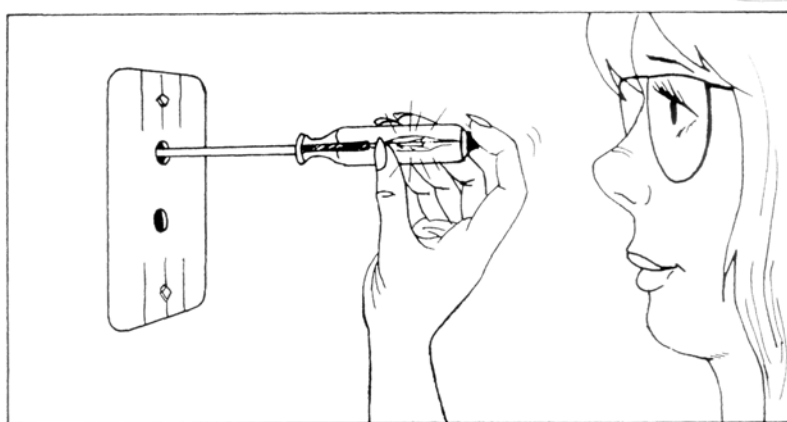
### ACTIVIDAD 5

Se considera la descarga de dos condensadores idénticos –es decir, con la misma capacidad y la misma carga inicial– a través de dos resistencias diferentes. Para la resistencia más alta, las cantidades siguientes, ¿son mayores, menores o iguales que para la resistencia menor?

- 5.1. Tiempo necesario para que la carga inicial disminuya a la mitad.
- 5.2. Potencial en las armaduras del condensador en un momento dado.
- 5.3. Corriente a través de la resistencia en un momento dado.
- 5.4. Energía total disipada por el efecto joule de la resistencia.

### ACTIVIDAD 6

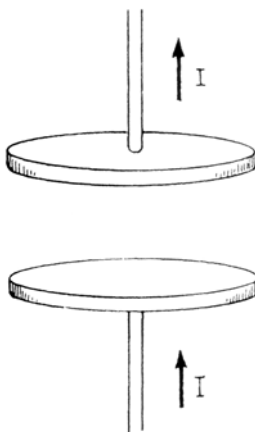
En los comercios se venden “destornilladores buscapolos” para trabajos eléctricos, provistos de una pequeña lámpara que se enciende cuando se pone el extremo del destornillador en contacto con uno de los dos conductores de corriente de la red (por ejemplo, en uno de los orificios de una toma de corriente).



- 6.1. ¿Cómo puede encenderse la bombita si el circuito no está cerrado?
- 6.2. ¿Por qué se enciende con uno de los dos conductores o polos del tomacorriente, y no con el otro?

**ACTIVIDAD 7**

En la siguiente figura, supongamos que las placas están inicialmente con carga cero y que la corriente indicada ha estado circulando durante cierto tiempo.



- 7.1. ¿Cuál es el signo de las cargas sobre cada placa?  
7.2. ¿Cuál es la dirección del campo eléctrico entre las placas?





***SEGUNDA SECCIÓN.  
APOYANDO LA PRÁCTICA  
EXPERIMENTAL***

---



En esta sección le proponemos un conjunto de actividades de neto corte experimental, orientadas hacia un doble propósito; por un lado, revisar los conceptos fundamentales de electromagnetismo y, por el otro, mostrar el significado concreto de aquéllos.

El detalle de estos trabajos puede verse en el apéndice de este módulo.

### La experiencia de Oersted

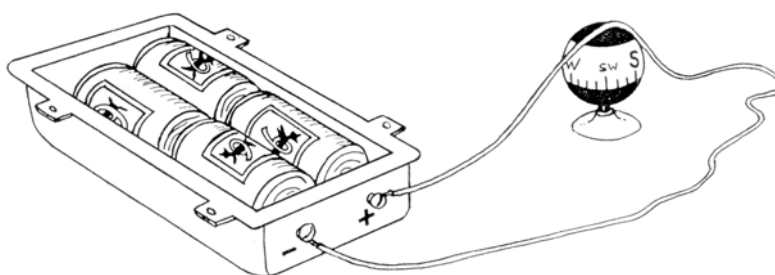
#### ACTIVIDAD 8

Planifiquemos un conjunto de experimentos destinados a detectar el campo magnético de una corriente.

Sus alumnos podrán poner en evidencia el efecto magnético de una corriente eléctrica mediante el empleo de una caja portapilas con sus pilas, un conductor cualquiera y una pequeña brújula.



Varios tipos de brújulas



Arme el circuito de la figura de acuerdo con las indicaciones prácticas que se dan en el apéndice de este módulo. Se trata de la clásica experiencia de Oersted, que permite detectar la existencia del campo magnético producido por una corriente eléctrica. Cuando la corriente (en este caso, la corriente continua producida por las pilas) pasa por el conductor, la aguja de la brújula se orienta en dirección perpendicular a éste.

<sup>5</sup> Probablemente, pueda responder acertadamente sin hacer el experimento, sea porque conoce el tema o porque halló la respuesta en textos. Pero, el rédito suyo consiste en hacer ese montaje o intentarlo. Lo educativo es no tanto la experiencia de Oersted sino encontrar una brújula, saber dónde la venden, conocer su precio, improvisarla con un imán o con una hojita de afeitar o una aguja de coser insertada en un material que flote, conectar las pilas, ubicar un falso contacto... ¡Pídale ayuda a sus alumnos! A ellos les gustará responder al cuestionario junto con usted y armar el aparato.

El siguiente cuestionario puede completar la experiencia propuesta<sup>1</sup>:

- 8.1. ¿Qué sucede si la aguja magnética se coloca en dirección paralela al conductor por el cual circula una corriente eléctrica?
- 8.2. ¿Qué pasa si el conductor por el cual circula corriente es colocado perpendicularmente a la aguja magnética orientada por el campo magnético terrestre?
- 8.3. ¿Qué conclusiones permite obtener el experimento?

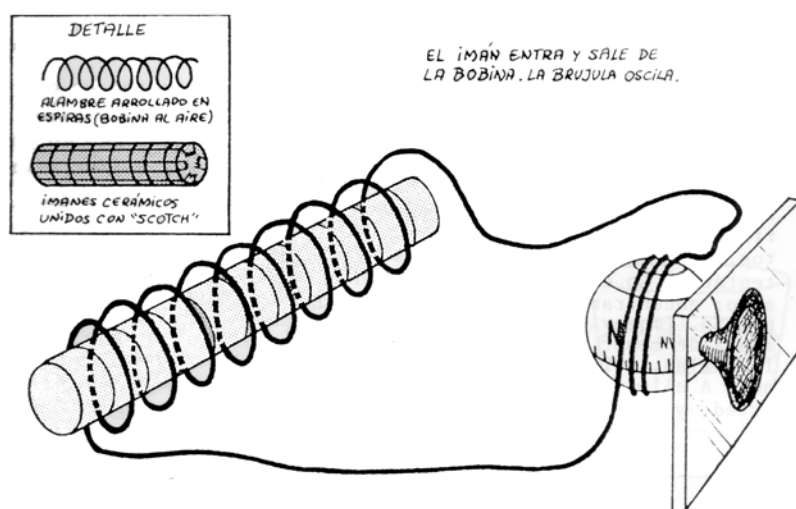
### Las experiencias de Faraday

#### ACTIVIDAD 9

Faraday se preguntó lo siguiente: Si una corriente eléctrica puede producir un campo magnético, ¿no se podría lograr que un campo magnético produzca una corriente eléctrica?

La experiencia consiste en presentar una bobina dentro de la cual hay un imán. La bobina está conectada a un galvanómetro. El imán es retirado rápidamente. En el momento en el que el campo magnético sufre una variación (cuando el imán es retirado del interior de la bobina), pasa una corriente efímera por el circuito, que puede ser detectada por el instrumento.

Si el imán es introducido, luego, en forma veloz, en el interior de la bobina, el fenómeno se repite pero la corriente tiene sentido contrario.



- 9.1. ¿Cuándo se observa la producción de una corriente eléctrica?
- 9.2. ¿Qué pasa cuando el imán es retirado de la bobina o introducido en ella?
- 9.3. ¿Qué observaciones pueden hacerse con respecto a la mayor o menor velocidad con que se realiza la experiencia?
- 9.4. ¿Qué sucede si en lugar de mover el imán se mueve la bobina, dejando el imán inmóvil?
- 9.5. ¿Cuáles son las conclusiones generales de este experimento?

### ACTIVIDAD 10

La proponemos como actividad teórica, posterior a las experiencias.

El objetivo es lograr que los alumnos consideren las muchas posibilidades que se puedan imaginar con respecto a las relaciones mutuas entre la electricidad y el magnetismo.

Una corriente eléctrica produce, como lo hemos visto, un campo magnético. Si suponemos que partículas invisibles se desplazan por el conductor, podemos imaginar que el campo es el resultado de esta circulación.

10.1. ¿Producen campos magnéticos las cargas eléctricas inmóviles? ¿Qué experiencias se podrían hacer para probarlo?

10.2. ¿Qué sucedería si una carga eléctrica fuera puesta en movimiento mecánicamente? ¿Qué experiencias podrían hacerse para comprobarlo?

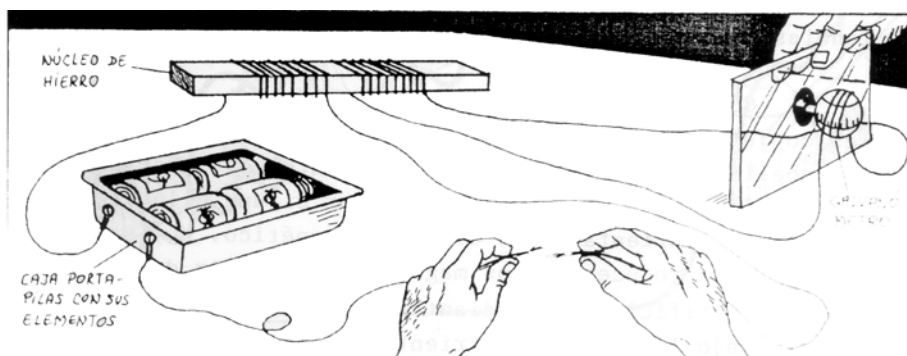
10.3. ¿Qué generalización podría obtenerse de esas experiencias?

Cuando los físicos del siglo XIX hicieron todas las posibles conjeturas acerca de las relaciones entre la electricidad y el magnetismo, exploraron diversas variantes que podrían ser válidas. Un ejemplo: Trataron de determinar si una pila eléctrica suspendida puede orientarse en el campo magnético. Hoy sabemos que solamente se producen campos magnéticos a partir de los imanes naturales o artificiales o mediante el movimiento de cargas eléctricas, sea bajo la forma de corrientes o de cargas que se movilizan mecánicamente. Esta última posibilidad no pudo ser confirmada hasta 1875, fecha en que Rowland obtuvo un campo magnético haciendo girar un disco cargado electrostáticamente.

### ACTIVIDAD 11

De la misma manera que conseguimos campos magnéticos moviendo cargas eléctricas, hemos logrado corrientes eléctricas moviendo campos magnéticos. Faraday exploró otras posibilidades que le parecieron viables: ¿Puede una corriente eléctrica producir otra corriente eléctrica? Partiendo del conocimiento de que las corrientes eléctricas producen campos magnéticos y sabiendo, a su vez, que los campos magnéticos son capaces de generar corrientes, intentó conseguir que una corriente eléctrica produjera otra corriente eléctrica.

La experiencia consiste en hacer pasar una corriente por una bobina. Esta bobina –que llamaremos *primaria*– está arrollada, sobre un mismo núcleo, con otra –que denominaremos *secundaria*– que no tiene contacto eléctrico con la primera (están aisladas). Cuando pasa corriente por la primera bobina, se produce un campo magnético. Este campo induce una corriente en la segunda bobina, que solamente circula en el breve intervalo en que se cierra el circuito. Cuando la corriente está circulando en el primario (si el contacto se mantiene), el campo magnético es constante y no hay inducción (recordemos que la corriente inducida solamente se produce si existe variación del campo magnético en la primera bobina). De la misma manera, cuando se desconecta el circuito primario, hay una nueva corriente inducida en el secundario; pero, esta vez, en sentido contrario.



11.1. ¿En qué momentos y bajo qué condiciones se produce una corriente inducida en la segunda bobina?

11.2. ¿Qué se observa con respecto al movimiento de la aguja del instrumento?

11.3. ¿Qué se necesitaría para obtener una corriente permanente en la segunda bobina?

## ACTIVIDAD 12

Las experiencias de Faraday permitieron revelar la existencia de los fenómenos de inducción electromagnética. Estas experiencias –con los elementos que tenía a su disposición Faraday– distan mucho de dar resultados “espectaculares”. Los alumnos tienen a su disposición materiales tan buenos o mejores que los que pudo utilizar el gran científico inglés. Sus biógrafos han dicho que, de no haber tenido la paciencia y el tesón experimental que tuvo, las leyes de la inducción no podrían haber sido descubiertas.

Seguramente, sus alumnos habrán quedado asombrados con el movimiento de la aguja del galvanómetro que se conectó a la segunda bobina; refuerce este efecto destacando que las experiencias de Faraday son la base de toda la tecnología moderna de la electricidad.

Sugerimos que usted presente a sus alumnos algunos fragmentos de las comunicaciones del propio Faraday, en las cuales relata los resultados de sus propias experiencias:

“Se arrollaron aproximadamente veintiséis pies de alambre de cobre sobre un cilindro de madera, formando una hélice, intercalando un delgado hilo para impedir que las diferentes espiras se tocan. Se cubrió esta hélice con tela de algodón y luego se aplicó un segundo alambre de la misma manera. En esta forma se superpusieron dos hélices conteniendo cada una una longitud media de alambre de veintisiete pies y todos en un mismo sentido. La primera, tercera, quinta, séptima, novena y undécima de estas hélices se unieron por sus terminaciones, extremo con extremo, de manera de formar una única hélice. Las otras se conectaron en forma análoga y así se obtuvieron dos hélices principales, estrechamente intercaladas, que tenían el mismo sentido, que no se tocaban en ninguna parte y que contenían cada una ciento cincuenta y cinco pies de alambre.

Una de estas hélices se conectó con un galvanómetro. La otra con una

batería voltaica de diez pares de placas (...) Sin embargo, no pudo observarse la más ligera desviación de la aguja del galvanómetro.

Se arrolló luego un alambre de cobre de doscientos tres pies de longitud alrededor de un largo trozo de madera; se intercalaron otros doscientos tres pies del mismo alambre como una espiral entre las vueltas de la primera bobina, impidiendo con hilos el contacto metálico en todas partes.

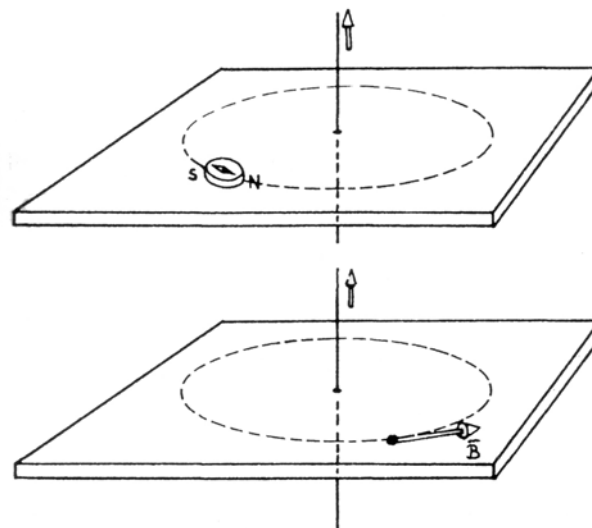
Una de estas hélices se conectó con un galvanómetro y la otra con una batería de cien pares de placas (...) Al establecer el contacto se produjo un ligero y repentino efecto sobre el galvanómetro, y también se produjo un ligero efecto similar cuando se interrumpió el contacto con la batería. Pero, mientras la corriente estuvo circulando, no se pudo observar ningún efecto en el galvanómetro.”

Analizar con detalles los trozos transcritos y explicarlos desde el punto de vista de las experiencias realizadas por los alumnos.

- 12.1. ¿Por qué razón la segunda experiencia tuvo un resultado positivo y no la primera?
- 12.2. ¿Qué tipo de núcleo utilizó Faraday en estas primeras experiencias y qué efecto tiene sobre los resultados?
- 12.3. ¿Qué modificaciones hizo Faraday entre la primera y la segunda experiencia y con qué objetivo?
- 12.4. ¿Qué podría decir acerca de la actitud de Faraday en relación con las tareas experimentales, a partir de este relato?

### ACTIVIDAD 13

Analizar con los alumnos la forma del campo magnético que se produce alrededor de un conductor. Si es necesario, repetir las experiencias ya realizadas. Los elementos realizados para hacer las experiencias pueden estar permanentemente en la clase (o el laboratorio), de modo que los grupos puedan hacerlas nuevamente, extendiendo los resultados ya alcanzados. En este caso, lo que fuera originariamente una simple constatación de la existencia del campo, se puede ampliar para poner en evidencia los demás aspectos.



Si una brújula pequeña se coloca alrededor del conductor en diversas posiciones, siguiendo una circunferencia, se comprueban las características vectoriales del campo (por ejemplo, observando la dirección que toma la aguja en cada punto, la intensidad del efecto rotatorio que produce la corriente).

Los físicos dibujaron líneas de campo alrededor del conductor para representar este efecto “invisible” y trazaron, tangencialmente, vectores en cada punto, representativos de la intensidad del campo.

13.1. ¿Qué forma tienen las líneas del campo magnético que se produce alrededor de un conductor recorrido por una corriente eléctrica continua constante? Dibujarlas.

13.2. ¿Qué sucede si se cambia el sentido de la corriente que pasa por el conductor, por inversión de los terminales de la batería?

13.3. ¿Qué sucede si se aumenta la intensidad de la corriente que pasa por el conductor?

13.4. ¿Qué se observa al alejar la brújula del conductor?

13.5. ¿Cómo se puede representar el campo magnético en cada punto de la zona que rodea al conductor? Hacer la representación.

El vector que puede representarse en cada punto del campo es el **vector inducción**. Recordemos, al respecto, que lo representamos con la letra **B** y lo medimos en tesla (T), también llamado weber por metro cuadrado (Wb/m<sup>2</sup>).

Recordemos que el valor de **B** depende de varios factores: la intensidad de la corriente, la forma del conductor, la distancia a éste y la naturaleza del medio. Estos elementos, sometidos a mediciones, dan lugar a la clásica expresión de Biot y Savart que los alumnos encuentran en sus textos:

$$B = 2.k.\frac{i}{d}$$

La generalización de este resultado en diversas expresiones (que implican integrales u operadores vectoriales) puede encontrarse en los libros de consulta que sugerimos en la bibliografía.

Recordemos que una corriente eléctrica constante produce un campo magnético, también constante. Ahora estudiaremos la producción de corrientes eléctricas a partir de campos magnéticos, que es descrita por la ley de Faraday.

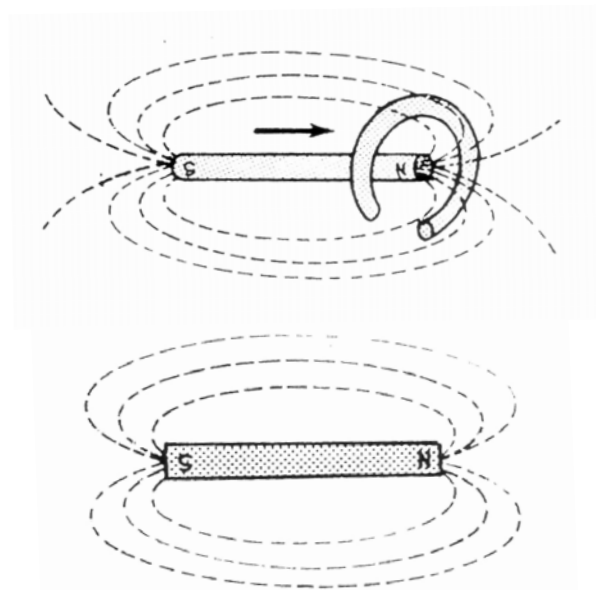
Nosotros intentamos mostrar que se puede presentar este tema sin recurrir forzosa-mente a la matemática; en una etapa posterior, y de acuerdo con las posibilidades de sus alumnos se pueden alcanzar algunas expresiones numéricas.

### **La ley de Faraday**

Faraday pudo producir corrientes eléctricas a partir de campos magnéticos variables. Precisemos un poco las circunstancias que rodean los problemas que analizamos. Una corriente eléctrica continua (la que produce una pila) produce un campo magnético que es, desde el punto de vista de los fenómenos que origina, equivalente al que producen imanes naturales o artificiales. Un campo magnético constante no origina



ninguna corriente eléctrica. Para que se manifieste este fenómeno hace falta una situación distinta: que el campo magnético se modifique por cualquiera de los medios que hemos mostrado con las experiencias. Esos medios son, naturalmente, el movimiento de las fuentes que producen el campo o la variación de éste cuando la corriente se modifica (en la experiencia de las dos bobinas).



Pensemos un momento en que cada una de las espiras de la bobina se halla atravesada por un campo magnético. Si hemos representado campos magnéticos con líneas de fuerza (circulares, en el caso de un conductor rectilíneo), bien podremos trazar la forma del campo en este caso. El imán tiene un campo cuyas líneas pueden ser dibujadas con la ayuda de la clásica experiencia de las limaduras de hierro o con el empleo de una pequeña brújula.

Centre la atención de sus alumnos en lo que ocurre cuando el campo magnético en que está sumergida la bobina experimenta un cambio.

La corriente eléctrica en la bobina aparece cuando el imán se aproxima al bobinado o se aleja de él.

En el dibujo que corresponde a esta experiencia se ha dejado sin cerrar una espira con el fin de que usted destaque a sus alumnos que entre los extremos del conductor debe aparecer una diferencia de potencial cuando se mueve el imán. Ahora bien, esta diferencia de potencial y fuerza electromotriz inducida debe ser el resultado de un campo eléctrico. La figura intenta mostrar que en la espira, y en relación con el campo magnético variable (y únicamente cuando el imán se mueve) debe haber un campo eléctrico responsable de la circulación de corriente cuando el circuito se cierra.

En los libros de nivel medio este tema se suele atender mediante expresiones aproximadas (por ejemplo con la ayuda de incrementos del flujo en relación con tiempos determinados). Si consideramos las cosas así, llegamos fácilmente a la expresión diferencial de:

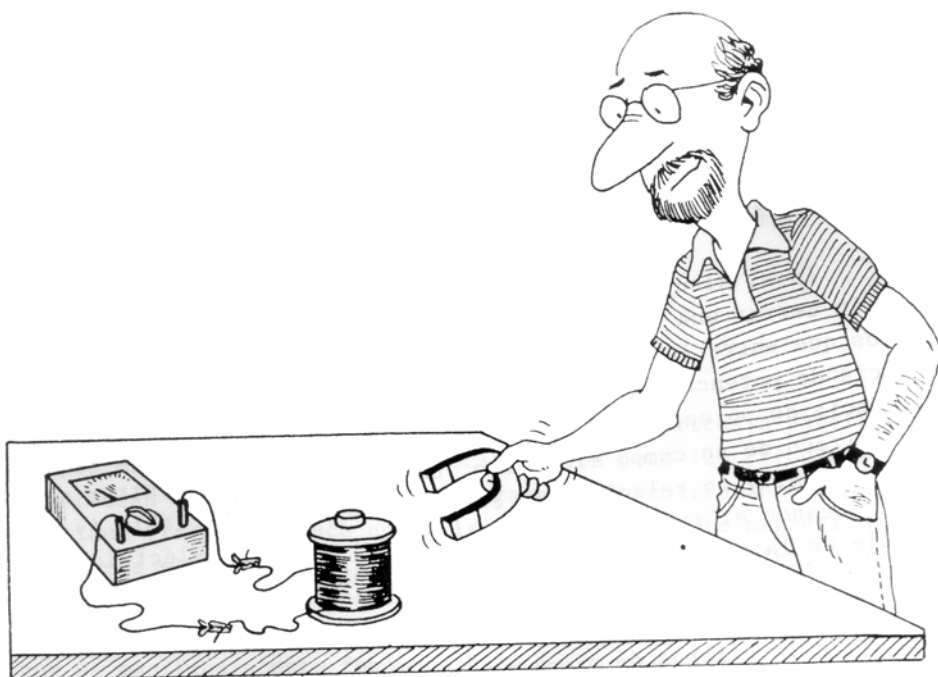
#### **La ley de Faraday**

La fuerza electromotriz inducida es proporcional a la rapidez de cambio del flujo de inducción que concatena el circuito, multiplicada por el número  $n$ , que es el número de espiras.

Nosotros, como ya lo hemos dicho, nos mantendremos, por ahora, en el plano de lo cualitativo. De nuestros alumnos pedimos expresiones de este tipo. Nos basta, por ejemplo, que realicen experiencias y que las interpreten.

### ACTIVIDAD 14

- 14.1. ¿Qué forma tienen las líneas de campo magnético en el exterior de un imán?
- 14.2. ¿Qué sucede cuando se introduce el imán en la bobina o cuando se lo retira de ella?
- 14.3. ¿Cuál es la expresión aproximada y cualitativa de la ley de Faraday?



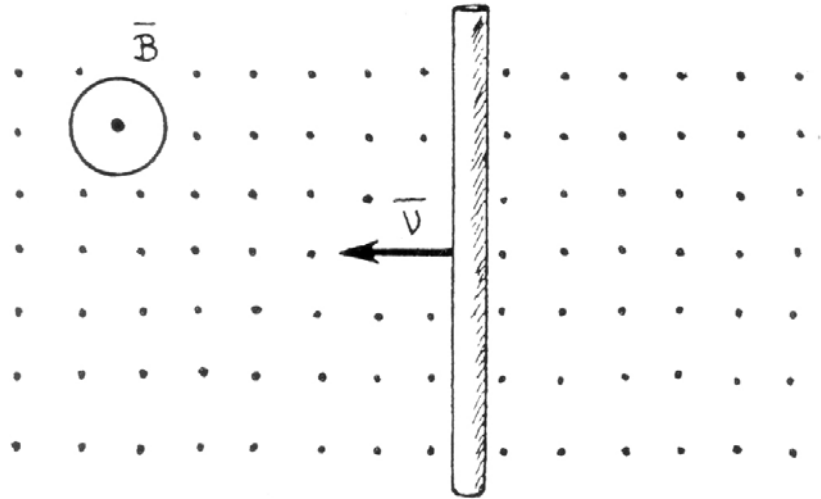
## ***TERCERA SECCIÓN***

---



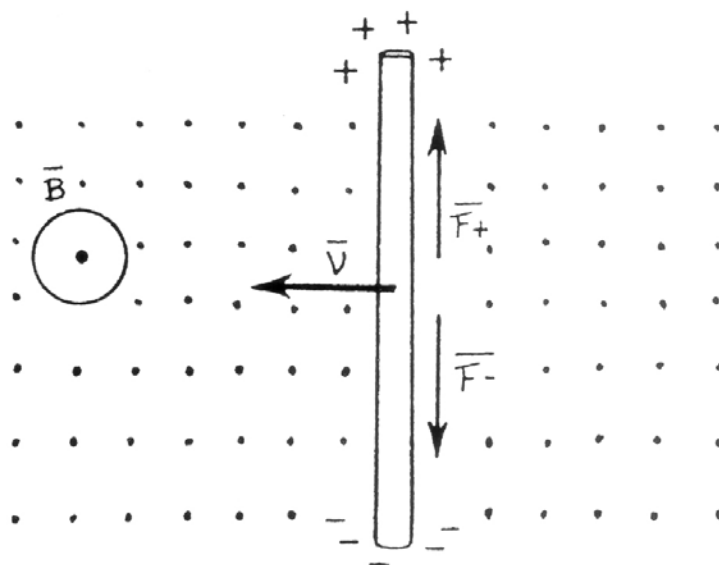
En esta parte trataremos de formalizar los resultados de las experiencias planteadas anteriormente. Usted decidirá la pertinencia de este planteo al tratar el tema con sus alumnos.

Analicemos primero qué es lo que ocurre cuando movemos un conductor dentro de un campo magnético:

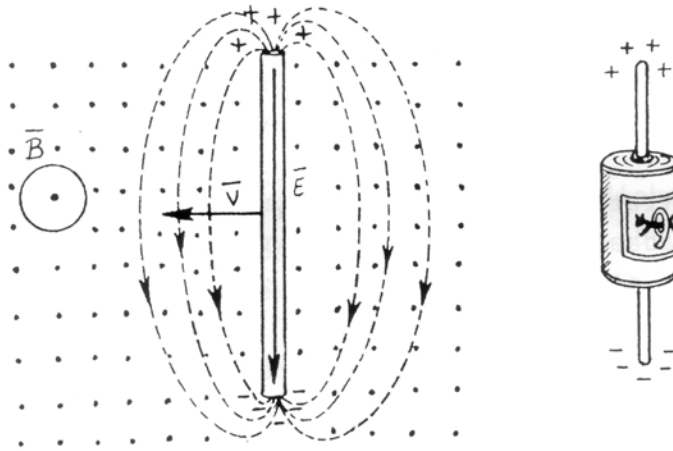


El alambre se mueve a velocidad constante dentro de un campo magnético uniforme perpendicular al plano del dibujo. Como el alambre es un conductor, contiene partículas cargadas capaces de moverse, si se les aplica una fuerza –en este caso, una fuerza magnética:  $F = q \cdot v \cdot B$ .

Esta fuerza empuja las cargas negativas hacia un extremo de la varilla y deja cargado positivamente el otro extremo.

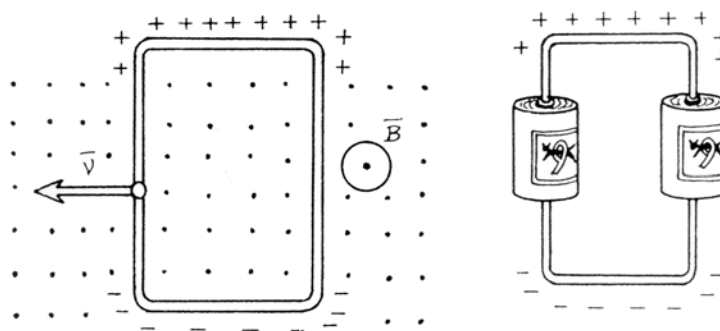


¿Hasta cuándo continúa este desplazamiento de cargas? ¿Seguirá siempre, mientras la varilla esté en movimiento? Pensémoslo: En cuanto las cargas negativas comienzan a acumularse en un extremo, se produce un campo eléctrico a lo largo del alambre y en sus proximidades:

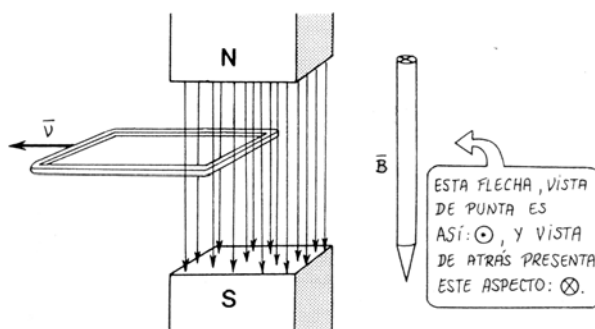


Es decir que la fuerza electrostática debida a este campo evita que prosiga la separación de cargas más allá de cierto grado, que dependerá de la velocidad del alambre y del valor del campo magnético exterior. Note que lo que se observa en este caso es, precisamente, lo que ocurre en cualquier circuito abierto cuando se conecta a una batería: las cargas se acumulan en los extremos del conductor.

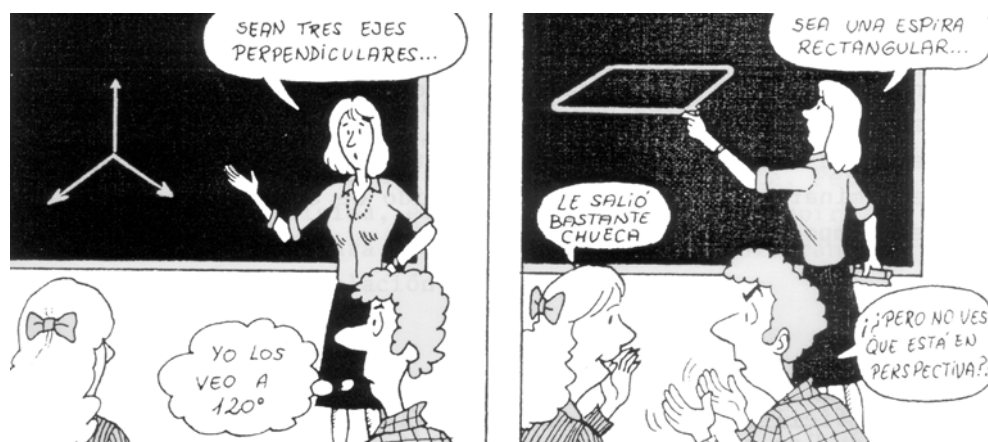
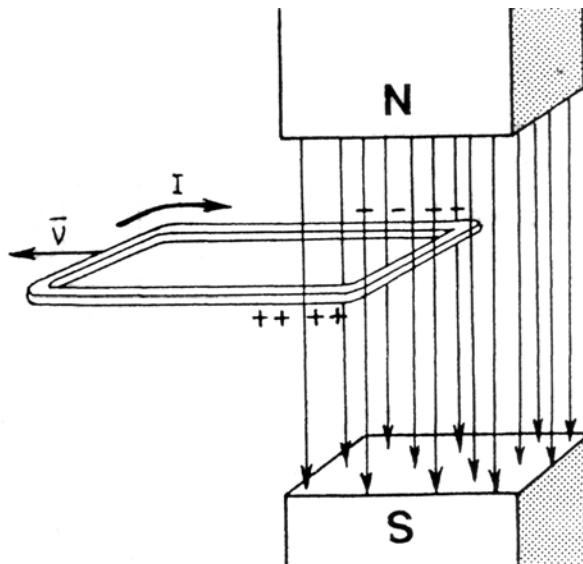
Podemos deducir de lo anterior que, si completamos el circuito cerrando el alambre, ¿circulará una corriente por él? Si lo cerramos por fuera del campo magnético o por dentro, pero con una conexión que no se desplace, sí circulará corriente. Pero, si lo cerramos en forma rígida, evidentemente no. Si la espira es rectangular, como en la figura, los lados opuestos adquirirán cierta carga pero no habrá circulación de corriente.



Preguntémonos, entonces, qué sucedería si moviésemos una espira a velocidad constante, parcialmente sumergida en un campo magnético uniforme –como indica la figura–.



Si la espira está mitad fuera y mitad dentro de la zona de campo magnético, se produce una corriente en el sentido indicado en la figura siguiente (recuerde que, convencionalmente, se le asigna a la intensidad de corriente el sentido del movimiento de las cargas positivas). Antes de analizar esta figura, intente determinar usted cuál será el sentido de circulación, de acuerdo al del campo y al de la velocidad<sup>1</sup>.

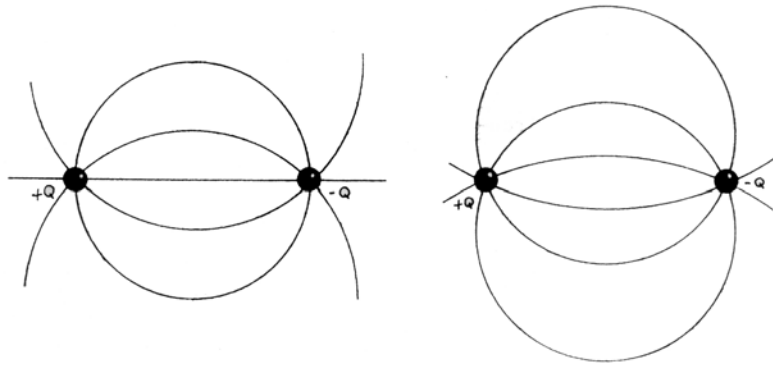


### Flujo e inducción

Si pensamos en el campo magnético como representado por líneas de fuerza, podemos utilizar la cantidad de líneas por centímetro cuadrado como un índice de la intensidad de campo magnético en esa zona: pocas líneas, campo débil; muchas, intenso.

<sup>1</sup> Es difícil representar en perspectiva las verdaderas direcciones de los campos, velocidades y corrientes. Nuestras ilustraciones han dado cuerpo a la espira, y se la ha concebido como construida con alambre de sección cuadrada, para facilitar la percepción espacial. Usualmente dibujamos en el pizarrón con trazos simples, y a los alumnos les cuesta imaginar la tercera dimensión. Use la mímica, tome un puntero y póngalo perpendicular al plano del pizarrón. En vez de dibujar tres ejes perpendiculares, señale un rincón del aula, haga gestos tridimensionales, dígales que el cielorraso es el polo norte y el piso el sur, y desplace un plano enrollado que hace las veces de conductor. Un recurso usado en muchos textos es representado así  $\odot$  a vectores salientes perpendiculares al papel del dibujo y con este otro símbolo  $\otimes$  a los entrantes, como si fuera una flecha vista de punta y de cola, con sus plumas.

Esto es puramente convencional, no existen realmente esas líneas, en cantidad determinada. No es posible contar las líneas de fuerza, su número es **convencional**, como así también el lugar exacto donde se representan.



A la magnitud caracterizada por la cantidad de líneas se la llama **flujo magnético:  $\Phi$**

A la caracterizada por la densidad de líneas se la llama **inducción magnética:  $B$**

*Las líneas de fuerza son sólo abstracciones. Ambos dibujos representan la misma densidad de líneas (campos iguales) y, sin embargo, las líneas están en distinto lugar.*

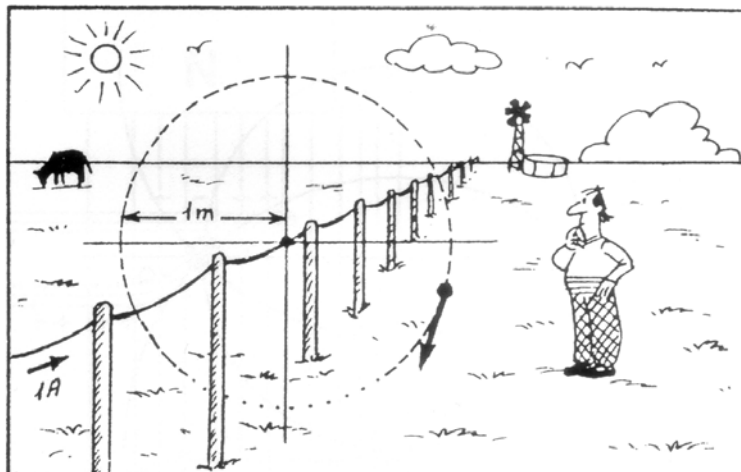
$$B = \frac{d\Phi}{ds}$$

$$\text{Y, si es uniforme, } B = \frac{\Delta\Phi}{\Delta s}$$

### Definición de $B$

Es frecuente que los textos mencionen el hecho de que la f.e.m. inducida en un conductor que se desplaza en un campo, sea proporcional a la velocidad y a la inducción, pero no definen a la inducción. O sea que la expresión (1)  $f.e.m. = k.v.B$  no sería entonces una ley, sino, nuevamente, una **definición** de  $B$ , a través de su efecto de generación de fuerza electromotriz.

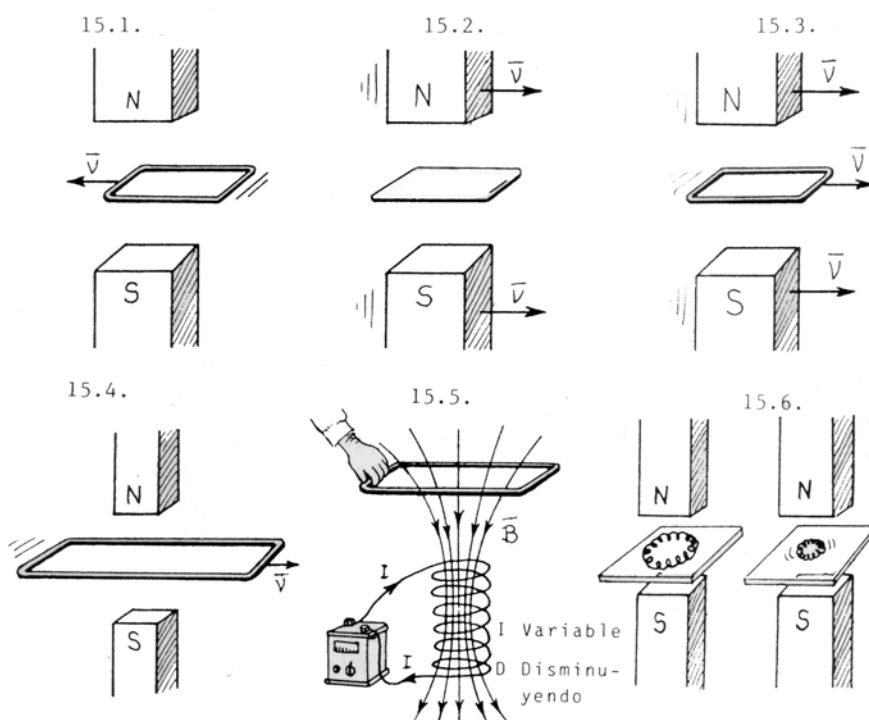
Si se profundiza el estudio, se verá que  $B$  admite una definición independiente de la expresión (1) o ley de Faraday. Se basa en las corrientes que circulan por conductores, que dan origen a  $\vec{B}$ , y de sus formas y tamaños. Así, es calculable, por ejemplo y en particular, la inducción que produce un conductor recto e infinito por el que circula un amperio, en un punto situado a un metro de distancia:  $2 \times 10^{-7}$  tesla, resultado de la definición integral de  $\vec{B}$ .





**ACTIVIDAD 15**

Diga, en cada uno de los siguientes casos, si circulará corriente por la espira o no.



Detengámonos ahora en la discusión del sentido de la corriente inducida en un circuito (esta corriente depende de la fem inducida y, por lo tanto, de la variación del flujo magnético a través del circuito; pero, también depende del material y de las dimensiones de éste, puesto que depende de su resistencia).

Imaginemos una espira rígida sometida a un campo  $\vec{B}$  externo, variable en el tiempo.

En la espira se inducirá una fuerza electromotriz, cuyo efecto será la circulación de una corriente. Ahora bien, esta corriente inducida creará a su vez un campo magnético inducido  $\vec{B}'$ .

Nos preguntamos qué relación existe entre el sentido de  $\vec{B}'$  y el sentido de **la variación** del campo primitivo externo.

Supongamos que  $\vec{B}'$  tenga un sentido igual que el de la variación de  $\vec{B}$ . Por ejemplo, si  $\vec{B}$  está aumentando, entonces  $\vec{B}'$  tendría el sentido de ese aumento, y vendría a reforzar a  $\vec{B}$ , entonces  $\vec{B}$  aumentaría más, y así se encadenaría un proceso de generación ilimitada de campos, corrientes y energías, sin aporte de nada exterior, lo que es absurdo. Es evidente que debe ocurrir lo opuesto:

El flujo del campo magnético originado por la corriente inducida en la espira, tiene sentido opuesto a la variación del flujo que produjo la fem inducida.



Con el análisis anterior se ve que esto constituye un hecho físico esencial y no un resultado de convenciones en cuanto a signos y sentidos. Hay investigadores que han visto en esto una evidencia de la tendencia de los sistemas a oponerse a los cambios. A este aspecto, presente en la ley de Faraday, se lo llama ley de Lenz, debido a que fue H. F. Lenz, físico alemán, quien descubrió esta propiedad. En rigor no debería llamarse ley, ya que se deduce de los principios electromagnéticos; surge como consecuencia de la ley de Faraday.

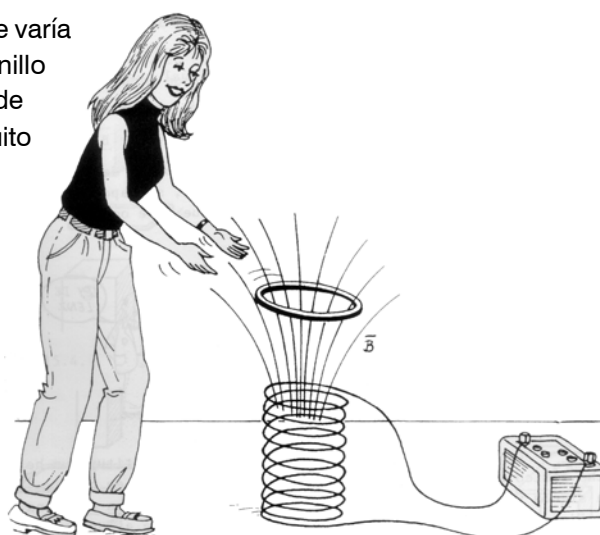
### ACTIVIDAD 16

A partir de lo mencionado sobre la ley de Lenz, analice cuál será el sentido del campo  $\vec{B}$  en el interior de la espira, debido a la corriente inducida en los ejemplos dados en la Actividad 15.

### ACTIVIDAD 17

Suponga que un anillo conductor cae dentro del campo magnético creado por una bobina –como indica la figura–. ¿En qué sentido circulará la corriente inducida?

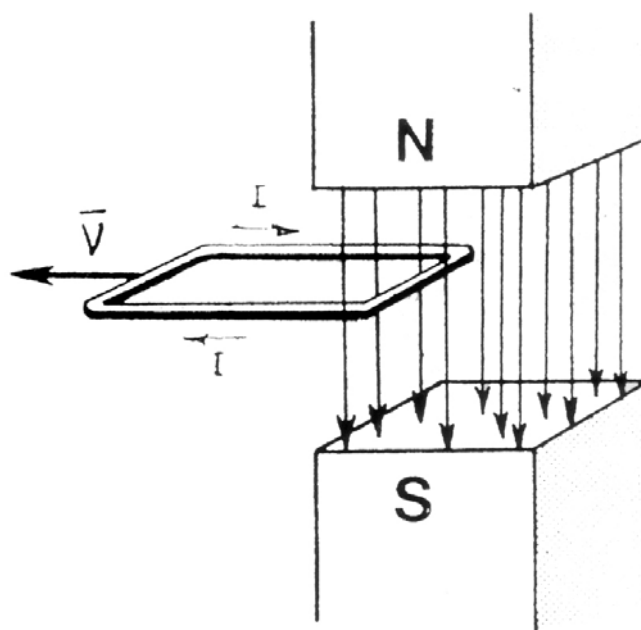
Note que el hecho de que varía el flujo magnético en el anillo produce una circulación de corriente (ya que el circuito es cerrado) pero no hay diferencia de potencial entre sus puntos. Lo que existe, como hemos visto, es una fuerza electromotriz.



*Modelo hidráulico para distinguir un caso de fuerza electromotriz asociada a una diferencia de potencial (izquierda) y una f.e.m. sin diferencia de potencial (derecha)*

Recordemos que llamamos fem a toda influencia que haga circular cargas a lo largo de un camino cerrado (no tiene que tratarse necesariamente de una batería, aunque éste sea el caso más común). La fem nos da una medida de la energía transmitida por cada carga elemental. Quizá esta denominación resulta confusa ya que no se trata de una fuerza; deberíamos llamarla energía electromotriz específica por unidad de carga, pero ningún autor usa tal denominación.

Vimos cómo se induce una corriente cuando movemos una espira de manera que cambie el flujo a través de ella o cuando sacamos rápidamente un imán del interior de una bobina. En todos los casos, si el circuito tiene una resistencia finita, la corriente que circula producirá una disipación de calor en el conductor. No hay baterías conectadas; entonces, ¿quién proporciona esta energía? Consideremos nuevamente el caso de una espira rectangular que sale de un campo magnético uniforme.



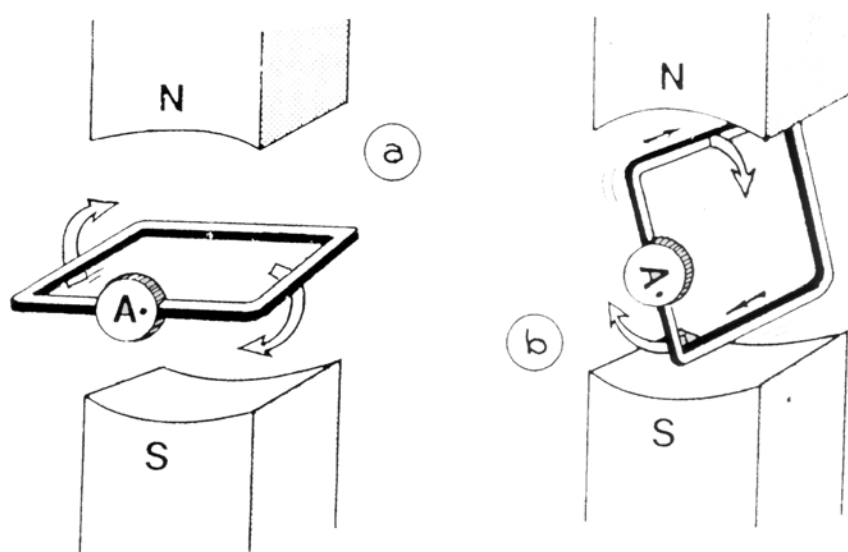
En la figura se ha indicado el sentido de la corriente inducida; las cargas en movimiento en la parte de la espira que aún permanece sumergida en el campo  $B$  experimentarán una fuerza que se opone al movimiento de la espira. Para mantener la espira en movimiento a velocidad constante, se le deberá aplicar una fuerza externa; es decir que deberemos hacer un trabajo sobre ella si no queremos que se detenga. Así es que todo el trabajo realizado por la corriente inducida se obtiene gracias a la fuerza que es necesario hacer para mover la espira a velocidad constante.

Este hecho nos muestra de manera simple la posibilidad de transformar energía mecánica en energía eléctrica (como lo hace un generador). También existe la posibilidad inversa, esto es, transformar energía eléctrica en energía mecánica, a la manera de un motor.

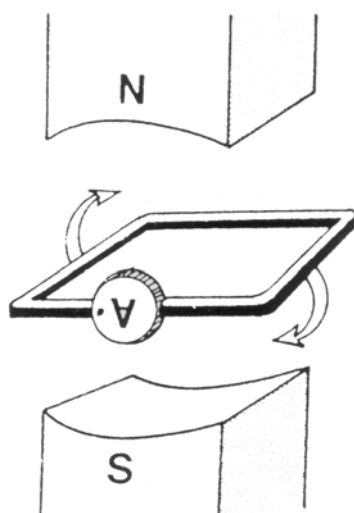
Es muy recomendable alentar las iniciativas que pudieran tener los alumnos de desarrollar y estudiar variados modelos de motores en desuso. No es imprescindible que usted sepa de antemano cómo funcionan exactamente; puede deducirlo con sus alumnos o preguntarnos por correo. Los modelos utilizados en autitos de carrera responden exactamente al propuesto por nosotros, aunque, para evitar que queden en la posición neutra y no arranquen, tienen tres contactos móviles (delgas) en vez de dos, que rozan contra dos carbones o escobillas.

## El generador

Consideremos el caso de una espira a la que se hace girar por medio de algún mecanismo externo, dentro de un campo magnético uniforme:

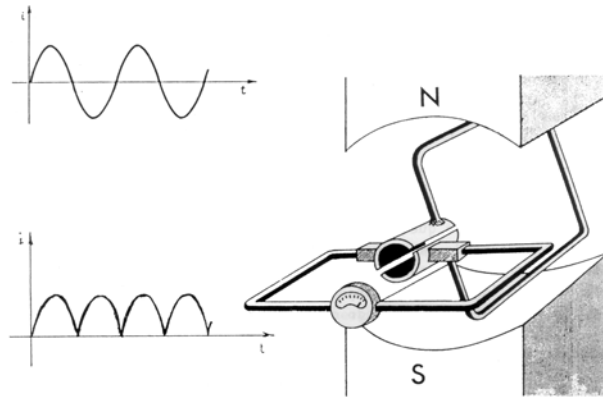


La espira gira alrededor de un eje horizontal de tal manera que el flujo que la atraviesa varía con el tiempo. Cuando la espira gira desde la posición a) hasta la posición b), el flujo disminuye y, por lo tanto, se induce corriente en el sentido indicado. Cuando la espira ha girado un ángulo de noventa grados, el flujo se hace cero. Continuando con el movimiento, el flujo comienza a aumentar hasta que la espira vuelve a ponerse horizontal, luego de haber girado media vuelta.



Al continuar el giro, el flujo disminuye (pero, en el sentido contrario que en la primera media vuelta ya que la espira está “cabeza abajo”), originando una corriente inducida en sentido contrario a la anterior, hasta que se termina la vuelta completa. Este dispositivo nos permite obtener corriente alterna de una manera simple, a expensas del trabajo que debemos realizar para hacer rotar la espira. Las centrales generadoras que proporcionan energía eléctrica a las ciudades funcionan sobre la base de este mismo principio, a partir del trabajo hecho por las turbinas.

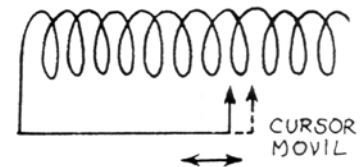
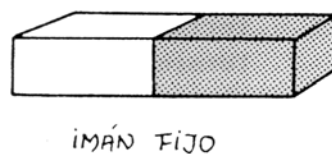
Si la espira gira con velocidad angular constante se obtendrá una fem y, por lo tanto, una corriente variable sinusoidalmente en el tiempo. Éste es el tipo de tensión que se suministra domiciliariamente con una frecuencia de 50 ciclos por segundo.



### ACTIVIDAD 18

El siguiente razonamiento, ¿es verdadero o falso?

Si se desplaza el cursor sobre la bobina colocada en el campo magnético constante, el flujo a través del circuito cerrado varía y, por lo tanto, existe una fem en el circuito.



### ACTIVIDAD 19

Todo circuito posee una inductancia por débil que sea. Por lo tanto, siempre aparecerá una fem inducida cuando la intensidad de corriente varíe. Cuando se acciona un interruptor, la resistencia pasa bruscamente a un valor prácticamente infinito. Si la corriente decae simultáneamente a cero, ¿no sería de esperar que apareciera una sobretensión ilimitada, debido a la fem inducida?

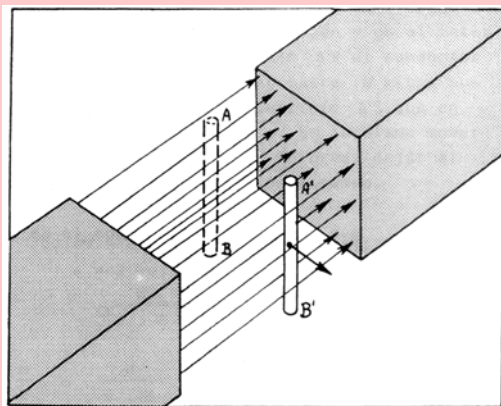
### ACTIVIDAD 20

20.1 Por un hilo rectilíneo indefinido, pasa una corriente variable. Una carga inmóvil colocada próxima a él, ¿experimentará alguna fuerza?

20.2 ¿Cuál sería su sentido? (Suponga que la carga es positiva y que la corriente, dirigida de izquierda a derecha, es creciente).

#### Problema 2

Un conductor rectilíneo AB de 50 cm de longitud se encuentra en un campo magnético cuyo vector inducción tiene intensidad  $B = 0,5 \text{ T}$ , dispuesto perpendicularmente a las líneas de inducción. Si el conductor AB se mueve en dirección perpendicular a las líneas de inducción con velocidad  $v = 800 \text{ cm/s}$ , calcular la fem inducida en el conductor.



En el intervalo de tiempo  $\Delta t$  el conductor barrió la superficie AA'B'B:

$$\Delta S = \ell \cdot \overline{AA'}$$

$$\Delta S = \ell \cdot v \cdot \Delta t$$

El flujo de inducción a través de esa superficie es:

$$\Delta \Phi = B \cdot \Delta S$$

$$\Delta \Phi = B \cdot \ell \cdot v \cdot \Delta t$$

y “la rapidez de barrido” es:

$$\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = B \cdot \ell \cdot v$$

Luego, la fem inducida en el conductor, teniendo en cuenta la ley de Faraday de la inducción electromagnética, es:

$$e = B \cdot \ell \cdot v$$

$$e = 0,5 \text{ T} \cdot 0,5 \text{ m} \cdot 8 \text{ m/s}$$

$$e = 0,5 \cdot 0,5 \cdot 8 \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{m/s}$$

$$e = 2 \text{ volt}$$

¿Por qué es  $\text{T} \cdot \text{m} \cdot \text{m/s} = \text{volt}$ ?

Recordemos que  $T = \frac{N}{A \cdot m}$

Luego,

$$T \cdot m \cdot \frac{m}{s} = \frac{N}{A \cdot m} \cdot m \cdot \frac{m}{s}$$

$$T \cdot m \cdot \frac{m}{s} = \frac{N \cdot m}{A \cdot s}$$

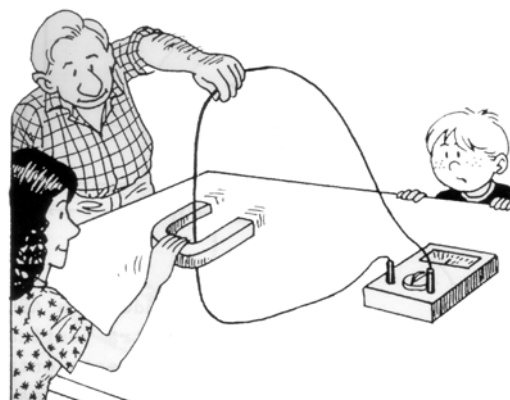
$$\text{y } \frac{N \cdot m}{A \cdot s} = \text{joule}$$

$$A \cdot s = C$$

Luego,

$$\begin{aligned} \text{T.m.} \frac{\text{m}}{\text{s}} &= \frac{\text{J}}{\text{C}} \\ \text{T.m.} \frac{\text{m}}{\text{s}} &= \text{volt} \\ e &= 2 \text{ volt} \end{aligned}$$

Contestar la misma pregunta anterior; pero, en el caso de que el conductor se quede inmóvil y sea el campo el que se mueva.



En el caso indicado y en el intervalo  $\Delta t$  el conductor AB barre la misma superficie  $\Delta S$  que en el caso anterior, respecto del campo magnético. Es lo mismo mover al conductor dentro del campo quieto que a la inversa: dejar al conductor inmóvil y mover en sentido contrario el campo.

Por lo tanto, en el conductor aparece una fem

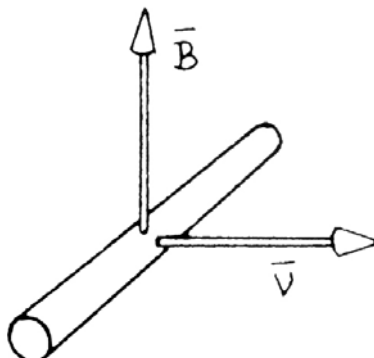
$$e = 2 \text{ volt}$$

### ACTIVIDAD 21

Un tren se dirige de Buenos Aires a Mar del Plata con velocidad numérica constante de  $v = 15 \text{ m/s}$ .

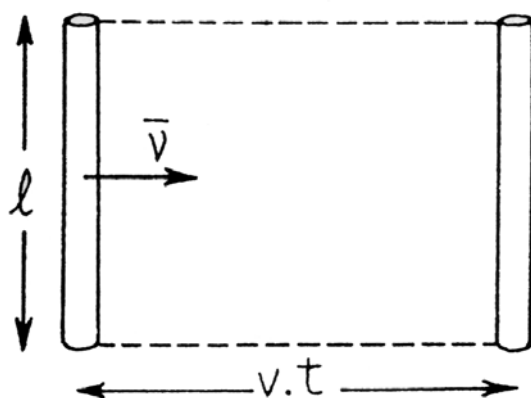
Suponiendo que, en la zona donde se mueve el tren, el campo magnético terrestre es uniforme y de componente vertical de  $\vec{B}$  igual a  $B = 5 \cdot 10^{-5} \text{ T}$ .

21.1. Calcular la fem inducida en cada eje de las ruedas del tren; la longitud de cada eje es  $l = 1,20 \text{ m}$ .

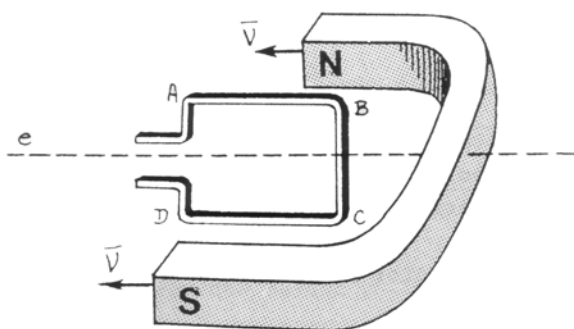




21.2. Responder la misma pregunta en el caso en que el tren se mueva de Mar del Plata hacia Buenos Aires en las mismas condiciones.



### ACTIVIDAD 22



Una espira plana conductora  $ABCD$  se encuentra verticalmente dispuesta entre los polos de un imán en herradura –como muestra la figura–; se supone que el campo magnético es uniforme.

22.1. Se mueve el imán horizontalmente, en una dirección paralela al plano de la espira. ¿Cuál es el valor de la fem generada en la espira? ( $v = 1 \text{ m/s}$ )

22.2. Se mueve el imán horizontalmente, en una dirección perpendicular al plano de la espira. ¿Cuál es el valor de la fem generada en la espira?

22.3. Se rota el imán, alrededor del eje  $e$ , (la espira queda quieta) un ángulo de noventa grados, en un tiempo de  $0,1 \text{ s}$ . ¿Cuál es el valor aproximado de la fem inducida en la espira?

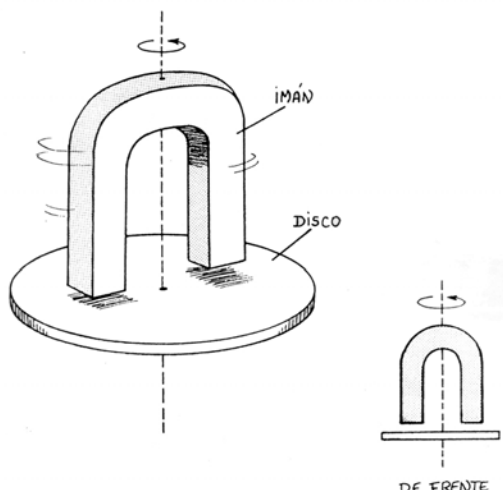
(La superficie de la espira es  $S = 0,001 \text{ m}^2$  y  $B = 10^{-5} \text{ T}$ )

### ACTIVIDAD 23

Se dispone un imán y un disco de metal no magnético (cobre, por ejemplo), como indica la figura. Los dos pueden girar alrededor de su eje.



Si se hace girar el imán, ¿qué hace el disco?



### La necesidad de las ondas

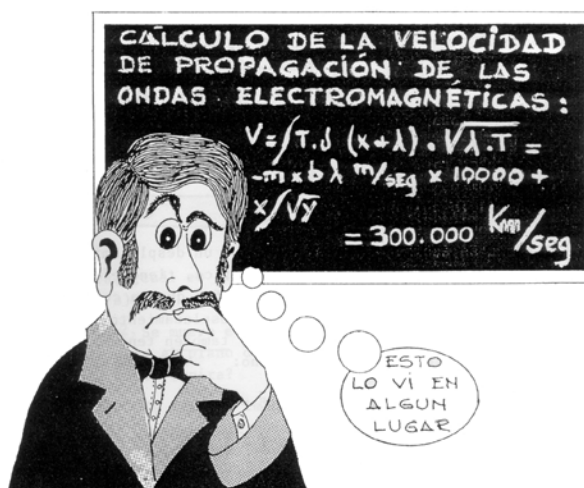
Desde Oersted se conocía bien que un desplazamiento efectivo de cargas, o sea una corriente eléctrica, tiene efectos magnéticos. La conjetura original de Maxwell fue que la corriente aparente, o sea la llamada corriente de desplazamiento (es decir, simplemente un campo eléctrico variable) también tendría efectos magnéticos. Se trata de un nuevo término:

Descripción antigua:  $\text{rot } \vec{B} = \vec{j}$

Descripción de Maxwell:  $\text{rot } \vec{B} = \vec{j} + \frac{d\vec{E}}{dt}$

donde  $\vec{j}$  es la densidad de corriente,  $\vec{E}$  el campo eléctrico,  $t$  el tiempo,  $\vec{B}$  el campo magnético y "rot" es una combinación vectorial de derivadas con respecto a las coordenadas espaciales  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

Este término calculado por Maxwell le permitió predecir las ondas electromagnéticas, como veremos más adelante. El hecho de que un campo eléctrico variable produce un campo magnético es muy difícil de demostrar experimentalmente. Para poder ver este efecto de inducción, necesitamos campos que varíen muy rápidamente. Se requiere que las variaciones tengan lugar en el tiempo que emplearía la luz en cruzar el aparato. Por este motivo, la demostración de la existencia de ondas electromagnéticas es una prueba posible, desde el punto de vista práctico, de la equivalencia entre la corriente y un campo eléctrico variable.





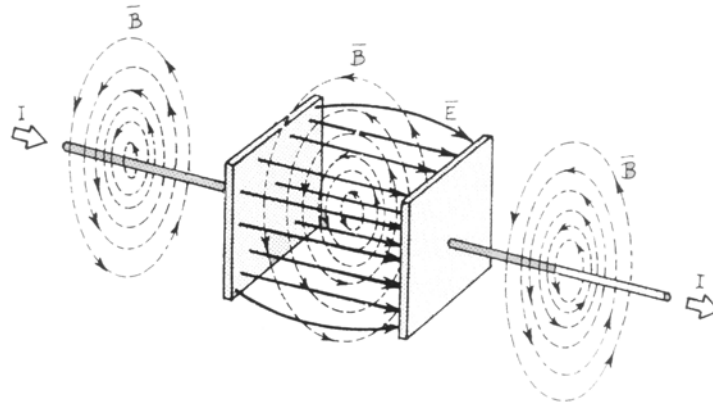
## ***CUARTA SECCIÓN***

---

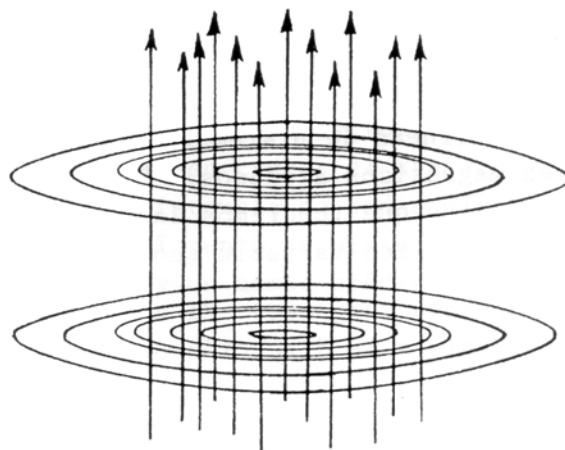


### Producción de ondas electromagnéticas

Ya vimos anteriormente qué formas tienen las líneas del campo magnético producido por una corriente; se trata de círculos cerrados alrededor de ella (las líneas de  $\vec{B}$  siempre son cerradas debido a que no existen polos magnéticos aislados). Vimos, también, en una de las secciones precedentes, que tendremos las mismas líneas en presencia de un campo eléctrico variable (como entre las placas de un condensador que se está cargando). El campo  $\vec{B}$  producido es perpendicular en todo punto a la dirección en que cambia  $\vec{E}$ .



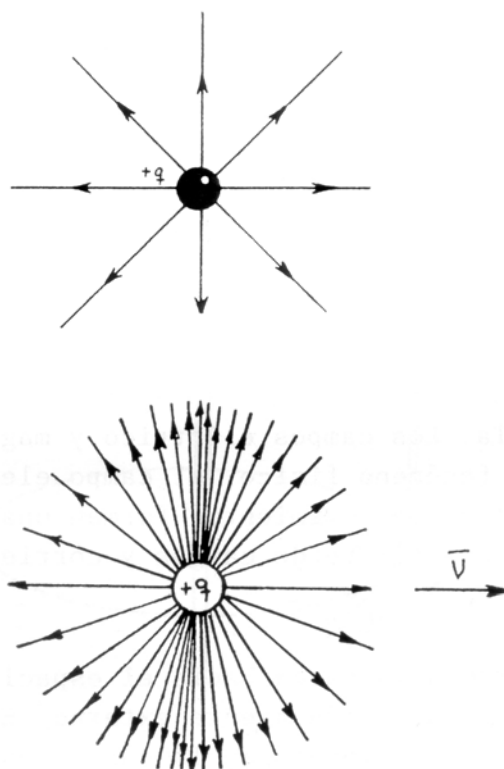
Por otro lado, sabemos que las líneas de campo eléctrico nacen en las cargas positivas y terminan en las negativas. A partir de la ley de Faraday conocemos el hecho de que un flujo magnético variable produce una fem y una corriente inducida, si se trata de un circuito cerrado. En cada punto del circuito debe existir, por lo tanto, un campo eléctrico responsable de la fuerza que acelera a las cargas. Las líneas de este campo, entonces, serán cerradas (no hay cargas aisladas presentes que generen el campo  $E$ ). Este campo  $E$  resulta perpendicular a la dirección de variación de  $B$ .



Resumiendo, aún en ausencia de cargas en una zona, podemos tener campo eléctrico producido por variaciones de campo magnético; y, aún en ausencia de corrientes, en una zona podemos tener campos  $B$  producidos por variaciones de campo eléctrico (es decir, corrientes de desplazamiento). Esta notable simetría llevó a Maxwell a predecir la posibilidad de existencia de ondas electromagnéticas (esto es, perturbaciones de campos eléctricos y magnéticos que se propagan en el vacío).

La pregunta que puede surgir en este punto es: ¿En qué casos estos campos son irradiados y se propagan alejándose de la fuente?

Tanto el campo eléctrico como el magnético son originados, en principio, por cargas en reposo o cargas en movimiento. Una carga en reposo produce un campo eléctrico estático, radial y extendido hasta el infinito (no se propaga alejándose).



Si la carga se mueve con movimiento rectilíneo uniforme, la situación es exactamente igual para un sistema inercial que se mueve solidariamente con la carga. En caso de que la carga tenga una velocidad constante relativa a nuestro sistema de referencia, se medirá el campo eléctrico más intenso en la dirección perpendicular a la velocidad, aunque sigue siendo radial, es decir que no habrá simetría esférica, existe una dirección privilegiada que es la del movimiento. Además aparecerá, debido al movimiento de la carga, un campo  $\vec{B}$  cuyas líneas son circunferencias con centro en la trayectoria de la carga: (estos resultados se obtienen a través de cálculos que involucran conceptos relativistas). En este caso tampoco hay irradiación de energía.

En esta parte, pretendemos hacer una descripción cualitativa de la producción y características de las ondas electromagnéticas, aunque, en relación con los alumnos, probablemente sea más interesante plantear las aplicaciones de este fenómeno y las actividades que permiten detectar la existencia de ondas.

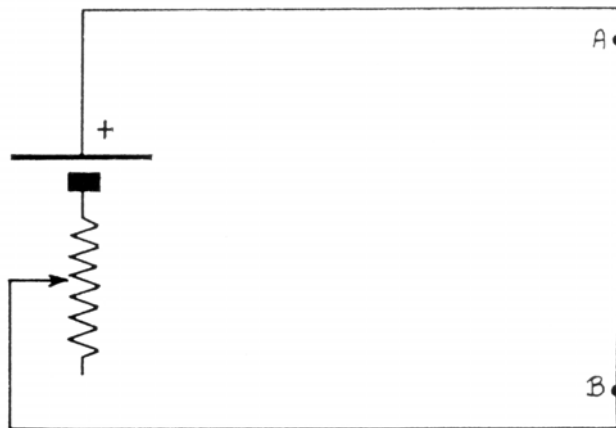
Consideremos una carga que por alguna razón acelera desde el reposo. En el instante en que comienza a moverse, el campo  $\vec{E}$  se altera en la vecindad de la carga y esta alteración se propaga hacia el espacio con velocidad finita. Este campo eléctrico variable en el tiempo induce un campo magnético  $\vec{B}$  que también cambia en el tiempo, ya que la carga sigue aumentando su velocidad. De modo que este campo  $\vec{B}$  genera un campo eléctrico  $\vec{E}$  y el proceso continúa con  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$  acoplados uno a otro en la forma de un pulso.

A medida que un campo cambia, genera un nuevo campo que se extiende un poco más allá y, así, el campo se mueve de un punto al siguiente a través del espacio. Se puede trazar una analogía quizá demasiado mecanicista pero que resulta descriptiva. Imaginemos las líneas de campo eléctrico como una densa distribución radial de cuerdas que nacen en la carga puntual. Cuando la carga acelera, cada cuerda individual se distorsiona para formar un pliegue que viaja alejándose de la fuente, formándose un pulso tridimensional que se expande.

La perturbación, una vez que ha sido generada en un campo electromagnético, es una onda que se mueve más allá de su fuente e independientemente de ella. Los campos eléctrico y magnético son dos aspectos del mismo fenómeno físico; el campo electromagnético, cuya fuente es una carga en movimiento; forma una entidad simple que viaja por el espacio libre de cargas y corrientes, sin necesidad de materia.

La energía que irradia la carga hacia el espacio que la rodea es suministrada a ella por algún agente externo: Ese agente es el responsable de la fuerza aceleradora la cual, a su vez, hace trabajo sobre la carga. Como en cualquier tipo de oscilaciones, hay casos de ondas electromagnéticas que son estacionarias y, por lo tanto, no transmiten energía.

Por ejemplo... Supongamos un conductor rectilíneo AB en el que se ha establecido una corriente eléctrica **constante**.

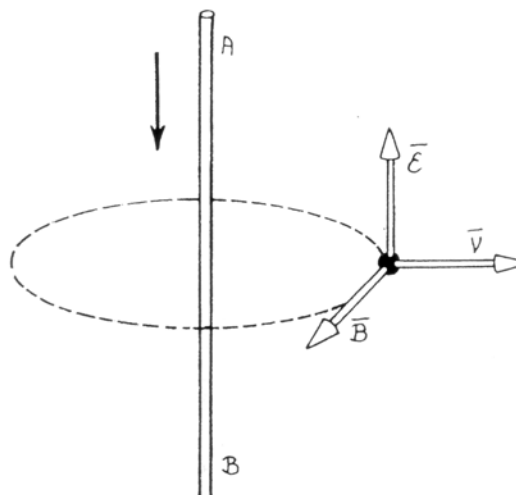


Esa corriente crea a su alrededor un campo magnético (efecto Oersted).

Ese campo magnético es constante en cada uno de sus puntos (no varía con el tiempo); las cargas eléctricas se mueven por el conductor AB.

Supongamos, ahora, que producimos un cambio en la intensidad de la corriente eléctrica; ello podrá ser logrado cambiando la posición del cursor de la resistencia variable R.

Las cargas eléctricas del conductor AB se acelerarán.



El vector  $\vec{B}$  de cada punto del campo variará; con ello se producirá un campo eléctrico  $\vec{E}$ ; cuanto más brusco sea el cambio de  $i$ , más grande será el módulo de  $\vec{E}$ . El campo eléctrico así creado se modifica con el tiempo y crea, a su vez, en puntos próximos un campo magnético; nace así un pulso electromagnético; en esencia ello implica que “una porción” de energía eléctrica y magnética, se propaga por el espacio.

¿Cómo lograr que a partir de la corriente  $i$  se obtenga una emisión continua de energía hacia el espacio?

En verdad, habrá que variar continuamente la intensidad de la corriente  $AB$ ; pero, además, para que el efecto sea verdaderamente notable, debemos usar un circuito oscilante de gran frecuencia, lo que se logra con un circuito abierto.

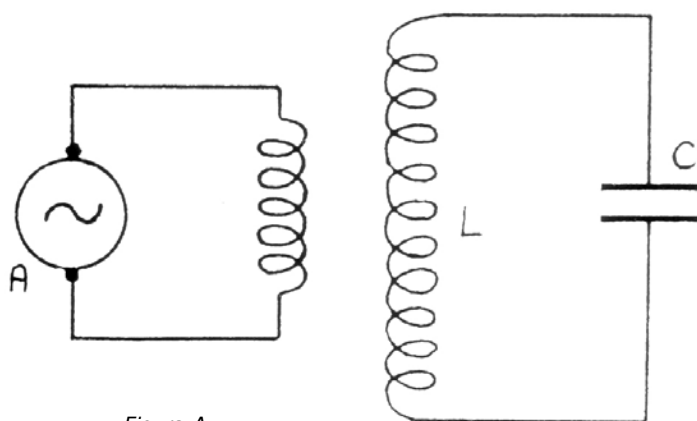


Figura A

En el caso de la figura A, la energía entregada al circuito que integran  $L$  y  $C$  está distribuida entre la bobina  $L$  (energía magnética) y el condensador  $C$  (energía eléctrica). El alternador  $A$  entrega energía al circuito que integran  $L$  y  $C$ ; de no existir disipación de energía por efecto calórico, bastaría con entregarle al circuito  $L$ - $C$  una cantidad de energía inicial para que las oscilaciones eléctricas continuaran en él indefinidamente; la energía se distribuiría entre  $L$  y  $C$ ; se transformaría de energía magnética (en  $L$ ) en energía eléctrica (en  $C$ ) y recíprocamente (circuito oscilante cerrado).

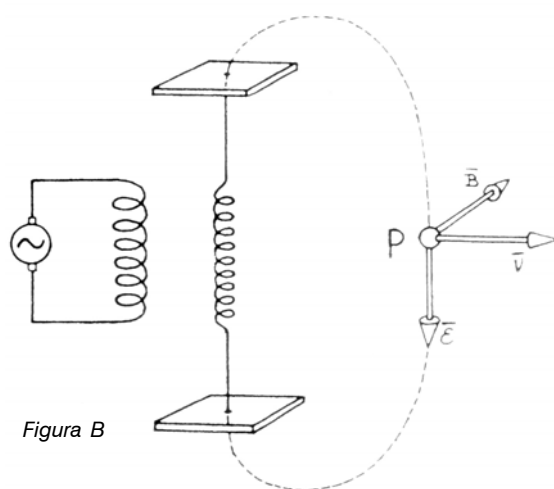


Figura B

Si en cambio separamos las armaduras del condensador, como se indica en la figura B, el dieléctrico del condensador es todo el espacio que rodea al circuito; pero, no es por esto que puede hacerse llegar energía a puntos distantes, sino que, al haber una capacitancia muy reducida, la frecuencia de oscilación es muy alta  $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}$  y, así, los campos  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$  varían muy rápidamente.



Al producirse oscilaciones eléctricas en el circuito de  $L$ , al desplazarse las cargas eléctricas de una armadura a la otra, el campo eléctrico en un punto  $P$  del espacio que rodea el circuito experimentará variaciones; toda variación del campo eléctrico crea un campo magnético.

Este campo magnético  $\vec{B}$ , al variar con el transcurrir del tiempo, origina en sus proximidades un campo eléctrico que, a su vez, produce un campo magnético.

Se tiene así una “cadena” de campos magnéticos y eléctricos que, en definitiva, implican la propagación de energía, de energía eléctrica y magnética, a través del espacio. Se ha producido una onda electromagnética.

En el caso particular de ondas de radio, la estación transmisora lanza cargas en una dirección y luego en la opuesta. No se mueven con velocidad constante sino que oscilan acelerando primero en una dirección y luego en la opuesta. Estas cargas eléctricas oscilantes en el circuito de la antena emisora ceden energía al medio que lo rodea; si queremos que este proceso de emisión sea sostenido, se deberá tener en el circuito de antena una fuente de energía eléctrica de tensión variable con el tiempo: un oscilador.

Deberíamos considerar también cuál es la dirección de propagación de la onda con respecto a los campos  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$ . El alto grado de simetría de los dos campos en el espacio libre sugiere que la perturbación se propagará en una dirección que es simétrica tanto a  $\vec{E}$  como a  $\vec{B}$  (recuerde que ambos son perpendiculares entre sí). Esto implicaría que una onda electromagnética no podría ser longitudinal. Trabajando con las ecuaciones, efectivamente, se llega al resultado de que en cada punto del espacio existe un vector  $\vec{E}$  y un vector  $\vec{B}$ , ambos perpendiculares entre sí y también perpendiculares a la dirección de propagación de la perturbación; es decir que se trata de una onda transversal.

Otro resultado de suma importancia que obtuvo Maxwell es el valor de la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en el vacío,  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s: Este valor teórico estaba en notable acuerdo con la velocidad de la luz previamente medida por Fizeau (315.300 km/s).

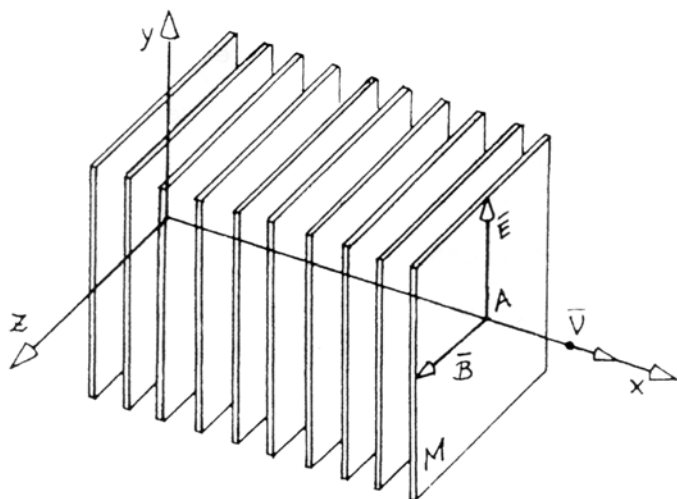
Los resultados de los experimentos de Fizeau, desarrollados en 1849 usando una rueda dentada rotatoria, estaban en manos de Maxwell y le hicieron comentar que:

“Esta velocidad (es decir su predicción teórica) está tan cerca de la luz que parece que tenemos una fuerte razón para concluir que la luz en sí misma (incluyendo calor radiante y otras radiaciones si las hay) es una perturbación electromagnética en la forma de ondas propagadas a través del campo electromagnético de acuerdo con las leyes del electromagnetismo.”

Esta brillante predicción se confirmó años más tarde.

Los frentes de ondas electromagnéticas pueden ser cilíndricos, esféricos, planos, etcétera.

A gran distancia del circuito productor del fenómeno que estudiamos, podemos aceptar que el frente de onda es plano, es decir que todos los puntos del plano perpendicular al eje en  $A$  tienen los mismos valores de  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$ , “vibran en fase”.



*Los planos son ideal e infinitamente extensos; se los dibuja, sin embargo, como cuadrados, para mayor claridad de la representación*

Tomemos un caso particular: Se tienen dos ondas, una eléctrica en el plano  $yx$  y otra magnética en el plano  $zx$ . Se trata de una onda electromagnética polarizada rectilíneamente: el vector  $\vec{E}$ , a lo largo del eje  $y$ , adopta posiciones sucesivas paralelas entre sí. Lo mismo ocurre con el vector  $\vec{B}$  en el eje  $z$ . La dirección de propagación es el eje  $x$ .

Hasta ahora no hemos dicho nada sobre la forma de la perturbación, es decir cómo cambian  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$  en cada punto, con el tiempo; sólo hemos hablado de los frentes de onda (plano esférico, etc.).

Las funciones armónicas son de particular interés puesto que cualquier forma de onda se puede expresar en términos de ondas senoidales (usando análisis de Fourier). Tomaremos este caso:

si por ejemplo es 
$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cdot \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$$

resulta 
$$\vec{B} = \vec{B}_0 \cdot \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$$

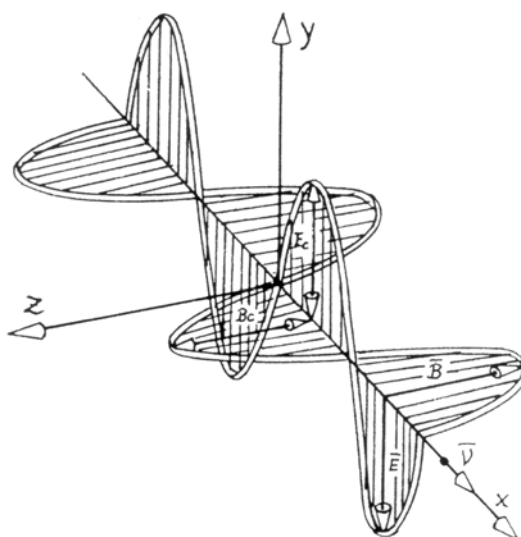
Donde  $E_0$  y  $B_0$  son los valores máximos de  $E$  y  $B$ , respectivamente.

$\lambda$  es la longitud de onda ( $\lambda = v \cdot T$ )

$T$  es el período de la onda y el período de la corriente eléctrica del circuito productor de la onda o circuito emisor.

Esta onda no requiere de medios materiales para su propagación; puede existir aún en el vacío.

Pero, ¿qué es lo que vibra? No es ninguna sustancia, son los vectores  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$  los que experimentan oscilaciones con el transcurrir del tiempo; y así se propaga energía a través del espacio.



De las ecuaciones de Maxwell surge también una relación entre las amplitudes de los campos:  $E = c \cdot B$  (recuerde que esta relación es sólo válida para el vacío; en presencia de medios materiales, la velocidad de la luz se modifica).

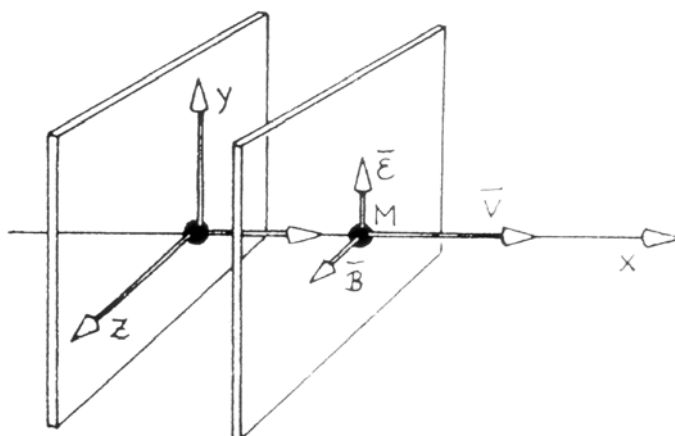
Se pueden graficar los valores de  $E$  o de  $B$  en función del tiempo para un punto fijo del espacio o en función de cada punto para un momento determinado.

¿Se podrá de detectar la onda?

Recordemos que la onda electromagnética, transporta energía; si podemos lograr utilizar esa energía, la onda quedará detectada.

Veamos cómo podemos hacerlo.

- a) Una onda electromagnética plana se propaga según el eje  $x$ ; un conductor  $AB$ , de longitud variable es colocado paralelamente al vector  $\vec{E}$  de la onda, en la posición  $M$ .



$\vec{E}$  en  $M$  varía con el tiempo. Supongamos que  $E = E_0 \sin \omega t$ .

Los electrones libres del conductor son acelerados y oscilan por acción de la fuerza que sobre cada uno de ellos produce el campo eléctrico, componente de la onda.

$\vec{E}$  tiene en cada instante, el mismo valor en todos los puntos del conductor, dado que la onda es plana y el conductor está colocado paralelamente al vector  $\vec{E}$ .

$\vec{E}$  cambia en M, con el tiempo; podemos aceptar que  $E = E_0 \sin \omega t$ ; es decir que la onda es sinusoidal.

Si cortamos al conductor AB en su punto medio y luego unimos las dos mitades por medio de una lamparita de bajo consumo energético veremos que, si “pasa” la onda electromagnética por M, la lamparita puede encenderse, si la energía de la onda es suficiente. (Note que el conductor no forma un circuito cerrado).

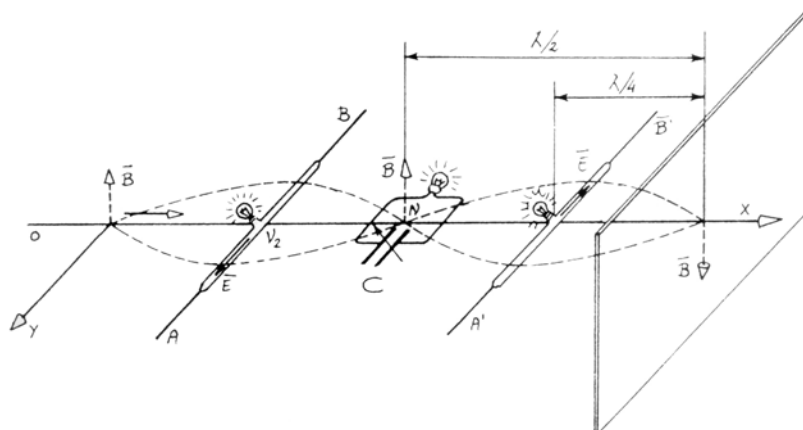
Si variamos la longitud del conductor AB, podemos lograr que la luminosidad de la lamparita sea máxima.

Ello ocurrirá cuando  $\ell = \frac{\lambda}{2}, \ell = 3\frac{\lambda}{2}, \ell = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$ , donde k es un número entero ( $k = 1, 2, 3, \dots$ ) (¿Por qué?)

En tal caso, los extremos de AB son nodos de la onda de intensidad I que se produce en el conductor; el punto medio, donde se coloca la lamparita, es un vientre de la onda de corriente.

La antena está en resonancia con la onda electromagnética.

- b) Otra forma de detectar la onda es recurriendo a la componente magnética de aquella; para ello empleamos un cuadro conductor que una las armaduras de un condensador variable C.



Si colocamos ese cuadro en el plano en que está polarizada la onda eléctrica (en el plano xy), al pasar la onda magnética originará una variación del flujo de inducción que concatena el cuadro conductor; dado que  $\vec{B}$  varía con el tiempo, lo mismo ocurrirá con el flujo de inducción que concatena el cuadro; y se originará una fem.

La lamparita irradiará luz; podemos lograr que la luminosidad sea máxima variando la capacidad del condensador hasta lograr que el período propio del resonador  $T = 2\pi\sqrt{L.C}$  coincida con el período de la onda magnética.

Le presentamos a continuación una serie de problemas vinculados con electromagnetismo. Hemos acompañado soluciones explicadas, con el propósito de acentuar los argumentos que tienden a la comprensión del problema y que ésta no resulte oscurecida por el cálculo (O sea, que el árbol no tape al bosque).

### Problema 3

Es posible producir ondas electromagnéticas que tengan longitud de onda de 1 centímetro. ¿Qué frecuencia debe tener un oscilador para generar ondas que tengan esa longitud de onda?

Recordemos que una de las formas de definir  $\lambda$  es: “Es el camino que recorre la onda en un período”.

Luego

$$\lambda = v \cdot T$$

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

Por lo tanto

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (1)$$

En nuestro caso  $v = 300000 \text{ km/s}$  y  $\lambda = 1 \text{ cm}$

Antes de reemplazar en la (1) los valores de  $v$  y  $\lambda$  debemos hacer un cambio de unidades; para ello utilizamos el método de sustitución:

$$1 \text{ km} = 1000 \text{ m}$$

$$1 \text{ cm} = 10^{-2} \text{ m}$$

Luego

$$v = 3 \cdot 10^5 \text{ km/s}$$

$$v = 3 \cdot 10^5 \cdot 10^3 \text{ m/s}$$

$$v = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

y

$$\lambda = 1 \text{ cm}$$

$$\lambda = 1 \frac{1 \text{ m}}{100}$$

$$\lambda = 10^{-2} \text{ m}$$

Reemplazando en (1)

$$f = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{10^{-2} \text{ m}}$$

$$f = 3 \cdot 10^{10} \frac{1}{\text{s}}$$

$$f = 3 \cdot 10^{10} \text{ Hz}$$

$$f = 3 \cdot 10^4 \text{ MHz}$$

#### Problema 4

Un haz de ondas electromagnéticas de  $\lambda = 1 \text{ cm}$  es dirigido hacia la Luna desde la Tierra; se reflejan en nuestro satélite natural y vuelven a la Tierra.

¿Cuánto tiempo empleará el haz desde su salida hasta su retorno al punto de transmisión? Distancia Tierra-Luna: 384.000 km.

Recordando que el movimiento de propagación de las ondas es uniforme

$$v = \frac{2d}{\Delta t}$$

Donde

$$d = 384.000 \text{ km}$$

$$v = 300.000 \text{ km/s}$$

Luego

$$\Delta t = \frac{2 \cdot d}{v}$$

Cambiando unidades

$$d = 384000 \cdot 10^3 \text{ m}$$

$$d = 384 \cdot 10^6 \text{ m}$$

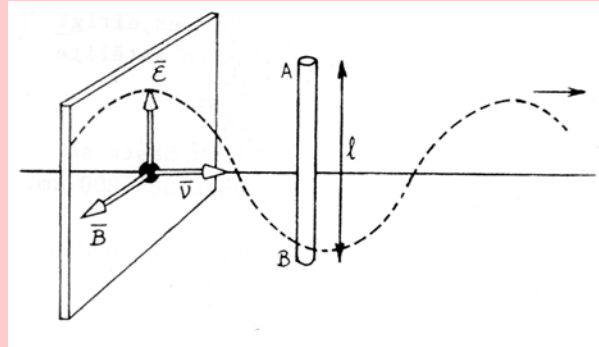
$$v = 300000 \cdot \frac{10^3 \text{ m}}{\text{s}} = 3 \cdot \frac{10^8 \text{ m}}{\text{s}}$$

$$\Delta t = \frac{2 \cdot 384 \cdot 10^6 \text{ m}}{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}$$

$$\Delta t = 2,56 \text{ s}$$

**Problema 5**

Un conductor de 10 m de longitud está orientado en la dirección del vector campo eléctrico de una onda electromagnética.



Si la diferencia de potencial entre los extremos del conductor ha de tener un valor máximo de  $10^{-4}$  volt, ¿cuál debe ser el valor máximo de la intensidad del campo eléctrico de la onda? ¿Cuál es el valor máximo de B?

Supondremos que la onda es plana. El conductor está ubicado perpendicularmente a la dirección de propagación de la onda y pertenece al plano de polarización de la onda eléctrica.

De esta manera, en todos los puntos del conductor y en cada instante, se tiene el mismo valor de E y de B.

Cuando E es máximo, también lo es B; pues, en este caso, las dos ondas, eléctrica y magnética, están en fase. Cuando E es máximo también lo será la diferencia de potencial entre los extremos del conductor:

$$V = E \cdot \ell \text{ (Recordar la definición de diferencia de potencial)}$$

$$V_{\text{máx}} = E_{\text{máx}} \cdot \ell$$

$$E_{\text{máx}} = \frac{V_{\text{máx}}}{\ell}$$

$$E_{\text{máx}} = \frac{10^{-4} \text{ V}}{10 \text{ m}}$$

$$E_{\text{máx}} = 10^{-5} \text{ V/m}$$

Siendo

$$E = v \cdot B$$

Donde  $v$  es la velocidad de la onda electromagnética

$$B = E / v$$

$$B = \frac{10^{-5} \frac{\text{V}}{\text{m}}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}$$

$$B = \frac{1}{3} \cdot 10^{-13} \text{ T}$$

### ACTIVIDAD 24

Una onda electromagnética plana se propaga en el vacío; en un determinado punto por donde pasa la onda, la componente eléctrica del campo tiene la siguiente expresión, en función del tiempo:

$$E = 10^{-6} \text{ sen } 2 \cdot 10^8 t$$

$$(t \text{ en segundos y } E \text{ en } \frac{\text{V}}{\text{m}})$$

Calcular:

- 24.1. El valor máximo del campo eléctrico.
- 24.2. La frecuencia de la componente eléctrica de la onda.
- 24.3. La frecuencia de la componente magnética de la onda.
- 24.4. La longitud de onda.
- 24.5. La expresión de  $B$  en función del tiempo.

### ACTIVIDAD 25

Responda verdadero o falso a los siguientes enunciados:

1. Carga implica campo  $E$ .
2. Carga implica campo  $B$ .
3. Carga en reposo implica campo  $E$ .
4. Carga en reposo implica campo  $B$ .
5. Carga móvil implica campo  $E$ .
6. Carga móvil implica campo  $B$ .
7. Carga móvil implica radiación de energía.
8. Carga a velocidad constante implica radiación de energía.
9. Carga acelerada implica radiación de energía.
10. Carga en movimiento circular uniforme implica radiación de energía.

### ACTIVIDAD 26

#### Los trabajos de Maxwell

La actividad que sigue ha sido pensada con el objeto de recapitular los



fenómenos y propiedades ya analizados y preparar el terreno, a fin de hacer una síntesis. Aunque no podamos seguir íntegramente el proceso del propio Maxwell, intentaremos, por lo menos, aproximarnos.

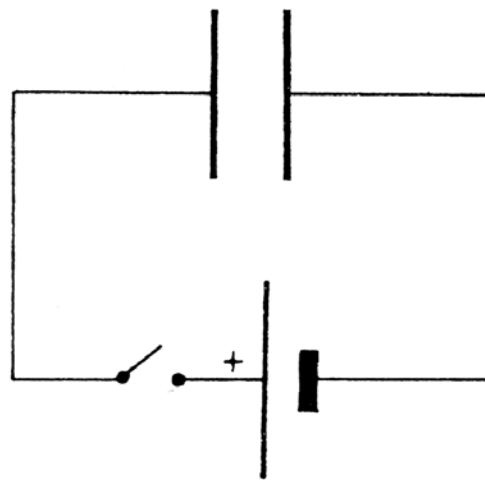
26.1. Alrededor de un conductor que lleva una corriente continua se forma un...

26.2. Alrededor de un conductor que lleva una corriente que cambia se produce un...

26.3. Si un campo magnético varía en las proximidades de un conductor en éste se produce...

26.4. El campo magnético variable se puede producir de más de una manera. Es posible tenerlo mediante...

26.5. Las corrientes eléctricas que pasan por un conductor son el resultado de la existencia de fuerzas electromotrices o diferencias de potencial. Si existe una diferencia de potencial hay también un campo eléctrico que está asociado a esa diferencia de potencial. Si la corriente varía, podemos pensar que el campo eléctrico...



26.6. Supongamos que una carga eléctrica o un conjunto de cargas se mueve. Las cargas producen un campo eléctrico. Cuando se mueven, el campo eléctrico se hace...

Pensemos en el fenómeno de carga de un condensador. Disponemos de un condensador cuyas placas se conectan a una batería. Antes de la conexión, el condensador está descargado. Cuando se conecta, pasa una corriente en un breve  $\Delta t$ : el capacitor se carga. Mientras este fenómeno de carga se produce, se establece un campo eléctrico variable entre las placas del condensador. Si el condensador después se descargara, con otro circuito, el campo desaparecería. En cualquiera de estos casos, el campo eléctrico se modifica.

26.7. ¿Cuál fue la idea fundamental de Maxwell con respecto a los campos eléctricos que son variables?

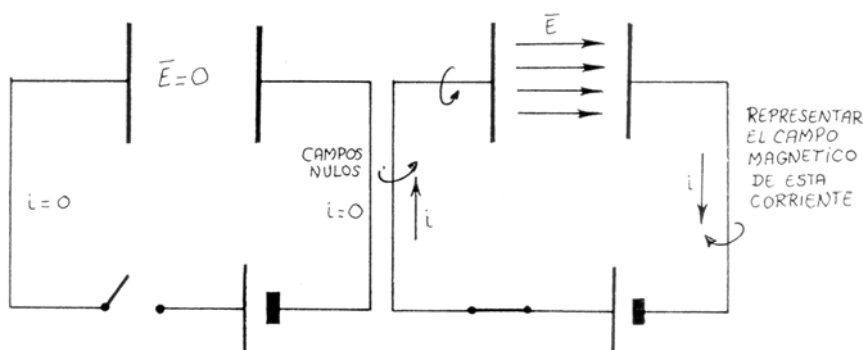
La gran idea de Maxwell es la hipótesis de que un campo eléctrico variable (como el que puede darse entre las placas de un condensador) también debe producir un campo magnético. Esta hipótesis es una de las más grandes manifestaciones de la ciencia moderna y la base de una gran parte de la moderna tecnología de las comunicaciones. Maxwell pensó que un campo eléctrico variable debe producir un campo magnético como consecuencia de una cierta intrínseca reciprocidad que él postuló entre los dos fenómenos.

Si esa hipótesis es correcta, no es necesario el conductor con la corriente circulando por él para que el campo magnético se manifieste. Si el campo eléctrico se modifica, el campo magnético se debe manifestar, aunque no haya ninguna corriente. El ejemplo clásico es el del condensador, sometido a periódicos cambios de polaridad o a variaciones de carga. Entre sus placas se produce un campo eléctrico, aunque no haya conducción de corriente variable, en la hipótesis de Maxwell, debe originar un campo magnético igualmente variable.

Volvamos al ejemplo del condensador que se carga a través de una batería. Maxwell pensó en la corriente de desplazamiento, que es “la corriente” producida entre las placas del capacitor. Sabemos que entre ellas no hay desplazamiento de cargas, sino establecimiento de un campo eléctrico variable. Para materializar el proceso, vamos a representar las líneas de campo en la situación anterior.

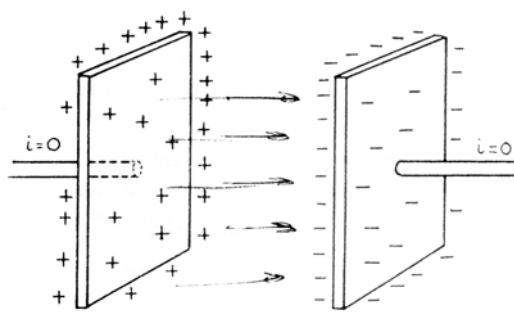
### ACTIVIDAD 27

Analicemos nuevamente lo que sucede cuando se carga un condensador. Sabemos que pasa una corriente durante un brevísimo intervalo de tiempo  $\Delta t$ . Mientras circula la corriente, existe, alrededor de los hilos conductores, un campo magnético.



27.1. Dibujar las líneas de fuerza de ese campo magnético (tener en cuenta su sentido), de acuerdo con la regla del tirabuzón (la mano derecha, con su pulgar en el sentido de la corriente positiva, nos da el sentido de giro).

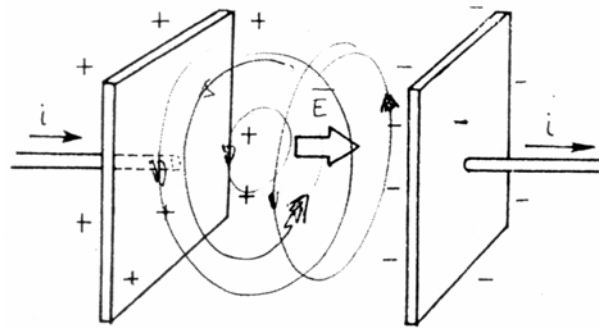
27.2. Considerar ahora la situación entre las placas del condensador. Originalmente, el campo eléctrico es nulo. Cuando el condensador está cargado y la corriente ya no circula, el campo queda establecido entre las placas. Dibujar las líneas de campo eléctrico entre ellas.



Capacitor cargado totalmente; no circula corriente

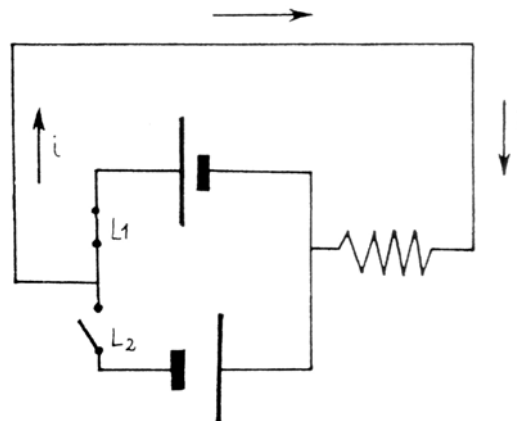
27.3. Considerar ahora la situación entre las placas en el intervalo en que el condensador se carga y el campo eléctrico varía. Maxwell supuso que alre-

dedor de este campo eléctrico variable hay, también, un campo magnético. Dibujar las líneas de campo tal como supuso Maxwell que debían existir.



*Campo eléctrico variable: Su intensidad aumenta a medida que aumenta la carga acumulada en las placas.*

27.4. Consideremos un circuito como el de la figura.



Cerrando la llave  $L_1$  y dejando abierta la  $L_2$ , la corriente se establece en el sentido horario. A continuación abrimos  $L_1$  y cerramos  $L_2$ : La corriente circulará en sentido contrario.

Actuando sucesivamente con ambas llaves, podremos lograr que la corriente cambie constantemente de sentido. Dibujar la forma del campo magnético en este caso. ¿Qué ocurre con la dirección y el sentido de  $B$  en un punto cualquiera?

## ACTIVIDAD 28

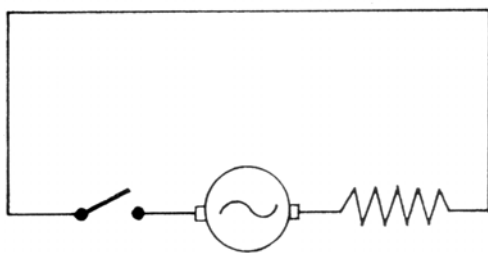
28.1. En los ejemplos anteriores, la corriente cambia continuamente de sentido. Por lo tanto, se puede decir que también está cambiando...

28.2. Un campo magnético variable origina...

28.3. De acuerdo con Maxwell, un campo eléctrico variable debe generar...

28.4. Maxwell pensó que este proceso debía producirse en cualquier circunstancia, aún no existiendo un conductor. En el circuito que sigue, la batería ha sido reemplazada por un generador que entrega una corriente alterna de muy alta frecuencia, es decir una corriente que cambia

continuamente de sentido. ¿Qué se podría suponer, teniendo en cuenta las ideas de Maxwell?

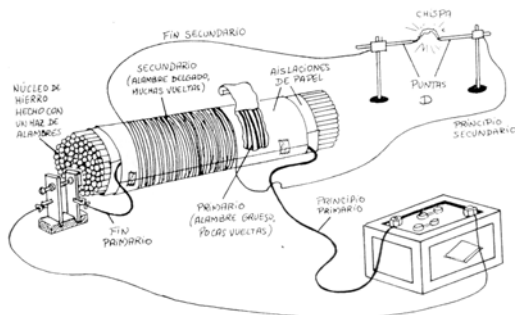


### ACTIVIDAD 29

Trataremos de producir ondas electromagnéticas, tal como las imaginó Maxwell. Los elementos que vamos a utilizar son los mismos que podían utilizar los físicos de la época. Hemos dicho que fue Heinrich Hertz (1857-1894), el primero en producir, en el laboratorio, ondas electromagnéticas cuyas características pudo estudiar y medir. Ellas son el antecedente de todas las ondas electromagnéticas que usamos para comunicarnos, por medio de la radio, la televisión, el radar, las microondas, etcétera.

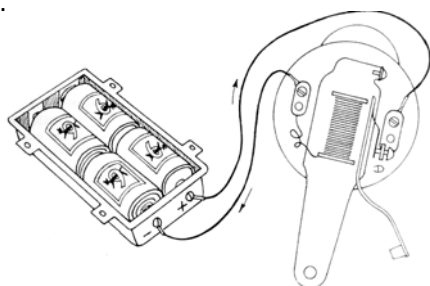
El elemento productor de ondas es similar al que utilizaban los investigadores de la época. En la actualidad es muy fácil preparar dispositivos electrónicos (por ejemplo, los multivibradores) que producen ondas adecuadas para nuestros propósitos experimentales. Sin embargo, con un timbre o una bobina de Ruhmkorff, la producción de una corriente variable es algo que está a la vista, cosa que no ocurre con el dispositivo electrónico, cuyos fundamentos son menos evidentes.

Comenzamos por utilizar una bobina de Ruhmkorff, que suele encontrarse, con cierta facilidad, en los laboratorios de física de las escuelas secundarias. Puede usarse también una bobina de automóvil.



Al variar la corriente eléctrica del primario, al abrir y cerrar ese circuito, se produce en el secundario una fuerza electromotriz elevada; entre las puntas D saltan entonces chispas eléctricas y se producen ondas electromagnéticas.

También podemos producir ondas electromagnéticas empleando una campanilla eléctrica.



Al circular corriente por la bobina de la campanilla, se produce la apertura del circuito eléctrico en D, con lo que se originan chispas eléctricas acompañadas por ondas electromagnéticas.

La experiencia consiste, simplemente, en la producción de ondas por medio de cualquiera de esos elementos. La detección de las ondas, en lugar de ser confiada a los dispositivos que utilizaban los físicos del siglo XIX, es una tarea que entregamos a una simple radio portátil.

Al igual que para las experiencias anteriores, sugerimos consultar el apéndice, en el cual se dan las ideas para utilizar ventajosamente los elementos que se pueden conseguir para los trabajos de laboratorio.

Con el timbre o la bobina (según se tenga) andando, pediremos a los alumnos que examinen lo que ocurre con la radio en diferentes zonas, en las proximidades del elemento, en primer lugar, y a diferentes distancias, después. Es interesante observar lo que sucede cuando se acerca mucho la radio a la fuente productora de perturbaciones... Una experiencia importante es la que resulta de comprobar cómo se puede producir la desaparición de una emisora local, tapada por los ruidos de la bobina o el timbre.

También importa mucho determinar lo que ocurre cuando se mueve el dial de la radio. Se comprobará que las perturbaciones se detectan estando el dial en cualquier posición, lo que indica que se producen en todas las frecuencias.

Los resultados de la experiencia serán objeto, naturalmente, de informes, individuales, por grupos, orales, escritos. En cualquiera de los casos, es importantísimo estimular la creatividad de los alumnos, insistiendo ante ellos acerca de las posibles variaciones experimentales de las tareas propuestas o incitándolos para que elaboren nuevos trabajos. Las fuentes de perturbaciones electromagnéticas son muchas y el ingenio de los alumnos suele ser grande. Veamos un ejemplo inusitado.

### **ACTIVIDAD 30**

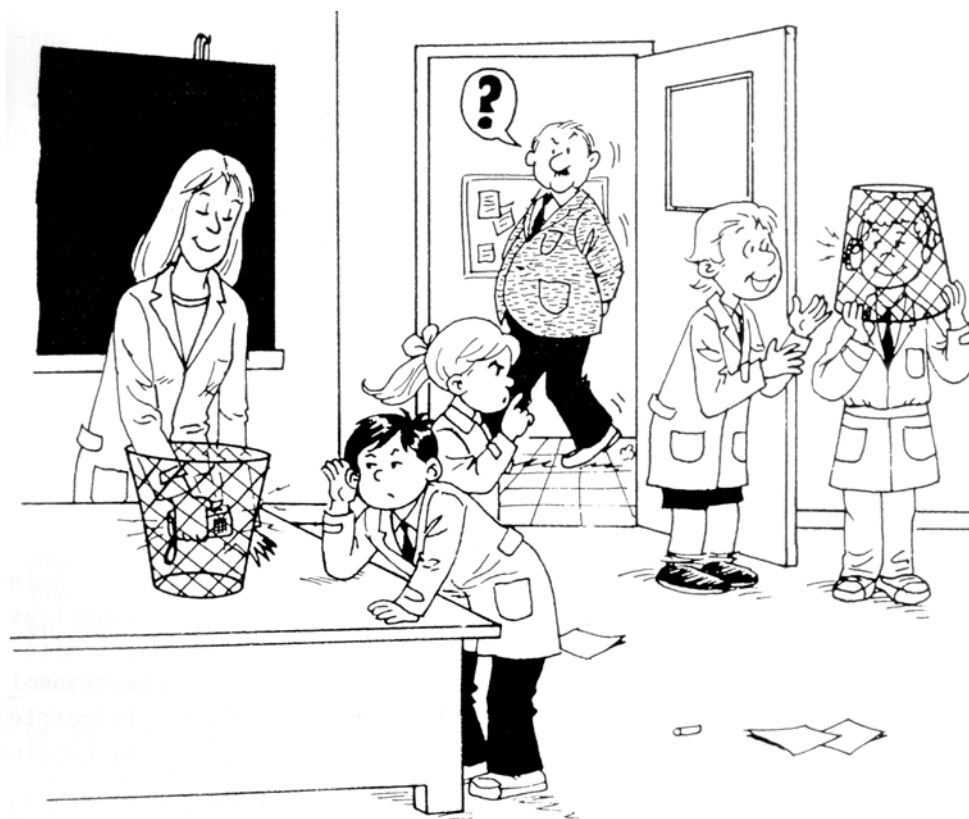
Hacer funcionar una calculadora electrónica común en las proximidades de una radio de transistores. Se escuchará toda clase de perturbaciones. El efecto será mucho más notable si la calculadora se pone próxima al elemento captador de ondas, que es la varilla de ferrita, un cilindro macizo de color negro, que es el núcleo sobre el cual se asienta la bobina de antena. En la calculadora, como consecuencia de los muchos circuitos de conmutación que existen, se generan también perturbaciones electromagnéticas que la radio detecta. Asimismo, la radio portátil detectará una señal si se la aproxima a un tubo luminoso de un anuncio o una vidriera.

### **ACTIVIDAD 31**

La realidad de las ondas puede ser puesta de manifiesto de muchas maneras. Una de ellas consiste en evitar que las ondas lleguen al receptor. Podemos comenzar por utilizar las experiencias de nuestros alumnos con relación al uso de la radio portátil. Dentro de una “caja” metáli-

ca, como puede ser un ascensor, la radio se oye mucho menos y lo mismo pasa debajo de un puente (cuya estructura es de acero, o de hormigón y acero) o en el interior de una casa de departamentos (que también tiene una estructura similar).

- 1) Coloque el conjunto formado por la caja portapilas y el timbre sobre la mesa. Ponga la radio a una cierta altura, verticalmente. Encienda el aparato y sintonícelo, preferentemente en un punto del dial en el cual no haya ninguna emisora. Anote la altura y tenga en cuenta la posición del aparato para mantenerlo en la misma situación en las experiencias siguientes. Haga funcionar el timbre y escuche la radiointerferencia con el receptor de radio.
- 2) Repita la experiencia, manteniendo las condiciones, pero colocando el conjunto del timbre y la caja portapilas, en el interior de una cacerola metálica. Anote las diferencias. Tenga en cuenta que no debe confundir el sonido directo (la vibración sonora del timbre) con el sonido emitido por el parlante (resultado de la captación de las ondas electromagnéticas por el aparato).
- 3) Ponga la tapa a la cacerola. Anote los efectos. Cambie la tapa por algo que la cubra, pero que no sea metálico. Anote los resultados. Utilice, en lugar de la tapa metálica, materiales que absorban fácilmente el sonido (trapos, algodones). Observe el efecto sobre las ondas electromagnéticas. Pruebe el efecto de un cesto de alambre para papeles y compruebe si la radiación electromagnética puede o no pasar por la malla de alambre.
- 4) Redacte un informe final mostrando las diferentes experiencias e ilustrándolas convenientemente. Relacione las experiencias con resultados que se puedan considerar equivalentes, en otras situaciones.



## ***QUINTA SECCIÓN***

---





## ***El espectro electromagnético***

La investigación moderna ha puesto en evidencia que un sinnúmero de fenómenos de apariencia muy distinta no son sino ondas electromagnéticas. La luz, que se ve, y las ondas de radio o televisión, que no se ven, parecen muy distintas, pero son de análogas características. Con todas las formas de energía radiante puede formarse el espectro electromagnético, en el cual se ordenan los diferentes tipos de ondas de acuerdo con su frecuencia.

Los nombres históricos que describen las diferentes regiones del espectro, suponen una clasificación conveniente relacionada con la fuente de la radiación. La naturaleza de la radiación es la misma en todos los casos. Todas viajan a la misma velocidad en el vacío y son de origen electromagnético. Asimismo, todas estas radiaciones transportan energía en mayor o menor medida y, al ser absorbidas por un cuerpo, éste se calienta. La única diferencia de una parte del espectro a otra es la frecuencia (o la longitud de onda en el vacío).

En 1887, ocho años después de la muerte de Maxwell, Heinrich Hertz, en Alemania, generó y detectó ondas electromagnéticas midiendo longitudes de onda del orden de un metro. No hay límite superior a la longitud de onda teórica, aunque la energía transmitida por ondas de  $\lambda$  muy grande es pequeña. Por ejemplo, la corriente alterna de 50 Hz que circula por las líneas de potencia irradia con una longitud de onda de  $6 \cdot 10^8$  m. El extremo de altas longitudes de onda del espectro se usa en comunicación, radio y televisión. Son, por lo tanto, las de menores frecuencias.

Si se aceleran las partículas cargadas de modo que oscilen en una frecuencia determinada, los campos eléctricos radiantes que se emiten tienen la misma frecuencia de oscilación. Cada estación transmisora de radio emite ondas a través de su antena a una frecuencia determinada. El campo eléctrico oscilante de estas ondas, a su vez, impulsa a las cargas de la antena receptora con la misma frecuencia. Las señales de radio son detectadas sintonizando un circuito oscilante en el receptor. Se selecciona una estación particular cuando el receptor se sintoniza con la misma frecuencia que emite el transmisor. De esta manera, la frecuencia de oscilación se transporta del transmisor hasta nosotros por medio de la radiación electromagnética. Las  $\lambda$  de las ondas de radio van desde algunos metros hasta decenas de kilómetros. Las ondas que tienen  $\lambda$  más grandes se difractan alrededor de cualquier obstáculo; pero, a medida que la longitud de onda disminuye, se comportan cada vez más como la luz; propagándose en línea recta y reflejándose y refractándose como las ondas luminosas. Las frecuencias de las ondas de radio van desde unos pocos Hz hasta  $10^9$  Hz,

Después de las radiofrecuencias y antes de llegar a la luz visible, se encuentra la zona de radiación calorífica (microondas e infrarrojo). La región de microondas se extiende desde  $10^9$  Hz hasta  $3 \cdot 10^{11}$  Hz de frecuencia y 30 cm a 1,0 mm de longitud de onda. La radiación capaz de penetrar notablemente la atmósfera de la Tierra está en el rango de menos de 1 cm hasta alrededor de 30 cm. Por consiguiente, las microondas tienen interés en las comunicaciones de vehículos espaciales y en radioastronomía. Con ellas se ha obtenido gran cantidad de información acerca de la estructura de nuestra galaxia y de otras.

Con ciertos circuitos eléctricos se pueden producir microondas de baja energía. Para producir las de mayor energía (mayor frecuencia) se utilizan los movimientos térmicos de las moléculas en gases y sólidos incandescentes. Este método también se usa para producir ondas de la región del infrarrojo, (desde  $10^{11}$  Hz hasta  $10^{14}$  Hz). Cualquier material puede irradiar o absorber ondas infrarrojas por agitación térmica de sus moléculas.

La parte visible del espectro es una **banda angosta** de frecuencias que van entre  $3,84 \cdot 10^{14}$  y  $7,69 \cdot 10^{14}$  Hz. Se produce generalmente por la desexcitación de los electrones exteriores de átomos y moléculas. Si llenamos un tubo con algún gas y pasamos una descarga eléctrica a través de él, los átomos dentro del mismo se excitarán e irradiarán. La luz emitida es característica de los niveles de energía particulares de esos átomos y está formada por una serie de bandas de frecuencias bien definidas (o líneas, por alusión a los espectrogramas de rendija).

Cerca de la luz visible está la región ultravioleta (aproximadamente  $8 \cdot 10^{14}$  Hz hasta  $3 \cdot 10^{17}$  Hz). Los rayos ultravioleta del Sol tienen suficiente energía para ionizar los átomos en la atmósfera superior y crear la ionosfera. Afortunadamente, el ozono ( $O_3$ ) en la atmósfera absorbe lo que de otra manera sería un haz letal de radiación ultravioleta.

A mayores frecuencias, entramos en la región de los rayos X. Ya a este nivel de energías es notable el comportamiento corpuscular de la radiación. Los fotones de rayos X son emitidos por un átomo o molécula cuando sus electrones interiores, fuertemente ligados, sufren transiciones o cuando se hace que una partícula cargada y de alta energía cambie su movimiento bruscamente (por ejemplo, electrones ultrarrápidos en un tubo de rayos X que frenan al chocar contra el blanco de metal de alta densidad).

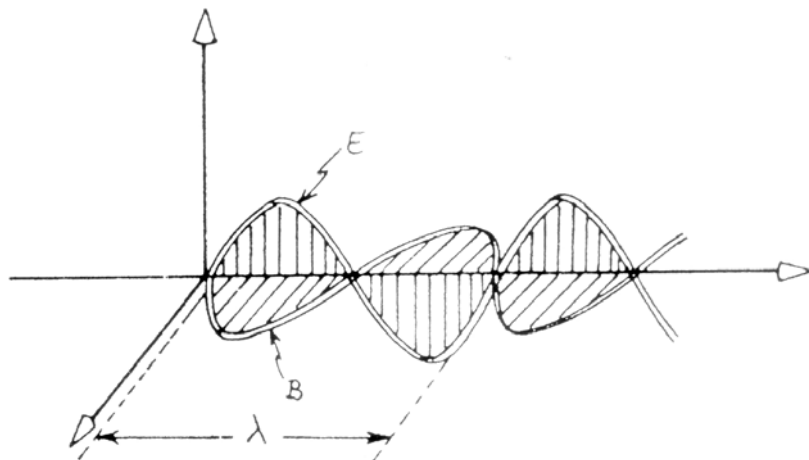
Las radiaciones electromagnéticas de más alta energía son los rayos  $\gamma$  y los de menor longitud de onda. Se emiten espontáneamente en procesos de desintegración radiactiva (es decir cuando hay transiciones dentro del núcleo atómico). Un solo fotón de rayos lleva tanta energía que puede ser detectado sin dificultad y es extraordinariamente difícil observar sus propiedades ondulatorias, tanto como es difícil observar las propiedades corpusculares de un “fotón” emitido por Radio Nacional.

EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO Y FUENTES TÍPICAS., DETECTORAS Y USOS DE LAS RADIACIONES ELECTROMAGNÉTICAS

	Rayos	Rayos X	UV	Luz	Infrarrojo	Microondas	Frecuencia ultraalta	Frecuencia muy alta	Alta frecuencia	Frecuencia media	Baja frecuencia	Frecuencia muy baja
Fuentes	Núcleos durante transiciones de energía. Partículas de alta energía durante reducciones de velocidad.	Átomos durante transiciones electrónicas. Electrones de alta energía durante reducciones de velocidad.	Átomos durante transiciones electrónicas.	Átomos durante transiciones electrónicas.	Moléculas durante transiciones rotacionales. Cuerpos arriba de 0°K. Átomos durante algunas transiciones electrónicas.	Aparatos electrónicos. Los electrones absorben y emiten estas radiaciones en la resonancia paramagnética.	Aparatos electrónicos. El hidrógeno interestelar emite la radiación de 21 cm.	Aparatos electrónicos.	Aparatos electrónicos. Los núcleos absorben y emiten estas radiaciones en la resonancia magnética nuclear.	Aparatos electrónicos.	Aparatos electrónicos.	Aparatos electrónicos.
Detectores	Emulsiones fotográficas. Contadores de Geiger y de cintilaciones. Cámaras de ionización. Detectores de semi conductor.	Emulsiones fotográficas. Contadores de Geiger y de cintilaciones. Cámaras de ionización. Materiales fluorescentes. Detectores de semi conductor.	Emulsiones fotográficas. Contadores de Geiger. Celidillas fotoeléctricas. Materiales fluorescentes.	El ojo. Emulsiones fotográficas. Celidillas fotoeléctricas.	Celidillas fotoeléctricas. Emulsiones fotográficas (cerca de infrarrojo). Pilas termoeléctricas (infrarrojo lejano). Bolómetros.	Aparatos electrónicos.	Aparatos electrónicos.	Aparatos electrónicos.	Aparatos electrónicos.	Aparatos electrónicos.	Aparatos electrónicos.	Aparatos electrónicos.
Usos científicos	Estructura nuclear. Procesos de partículas elementales.	Estructura atómica. Estructura de los cristales. Interacción de radiación y materia, incluyendo células	Estructura atómica. Interacción de la radiación con las células vivas. Fotoelectricidad. Descargas en los gases. Fluorescencia.	Estructura atómica. Visión.	Estructura atómica. Estructura molecular. Radiación del cuerpo negro.	Resonancia paramagnética del electrón.	Radioastronomía.		Resonancia magnética nuclear.			
Usos técnicos	Terapia de radiación. Inspección de materiales.	Exámenes médicos. Terapia. Inspección de materiales.	Germicidas. Fuentes de vitaminas. Análisis clínicos.	Visión. Fotografía. Análisis químico.	Percepción remota. Lámparas caloríficas. Fotografía. Análisis químicos.	Radar.	Televisión..	Televisión. Radio de FM. Comunicación móvil.	Radio-comunicación por convenios internacionales. Radio-comunicación de aficionados.	Radio-emisión de onda larga.	Radio-comunicación móvil. Radio-navegación.	Radio-comunicación móvil. Radio-comunicación fija.

**ACTIVIDAD 32**

Calcular la longitud de onda de una emisora radial cualquiera.



La banda de radiodifusión comercial, en todo el mundo, está comprendida en la zona de 550 kHz hasta los 1600 kHz. Esto se debe entender del siguiente modo: una emisora que tenga una frecuencia de 870 kHz, por ejemplo, tiene una longitud de onda que se puede calcular de la siguiente manera:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{300.000.000 \text{ m/s}}{870.000 \text{ c/s}}$$

$$\lambda = 345 \text{ m}$$

En un período, la onda electromagnética que consideramos recorre 345 m; es lo que ocurre con la onda irradiada por Radio Nacional de Buenos Aires.

Hacer lo mismo para determinar la longitud de onda de la emisora más próxima de Radio Nacional y de algunos de sus servicios de onda corta o frecuencia modulada. (MHz debe leerse *megahertzios*; un MHz equivale a 1.000.000 de ciclos por segundo. Un kc/seg es lo mismo que 1 kHz, esto es, 1000 ciclos por segundo).

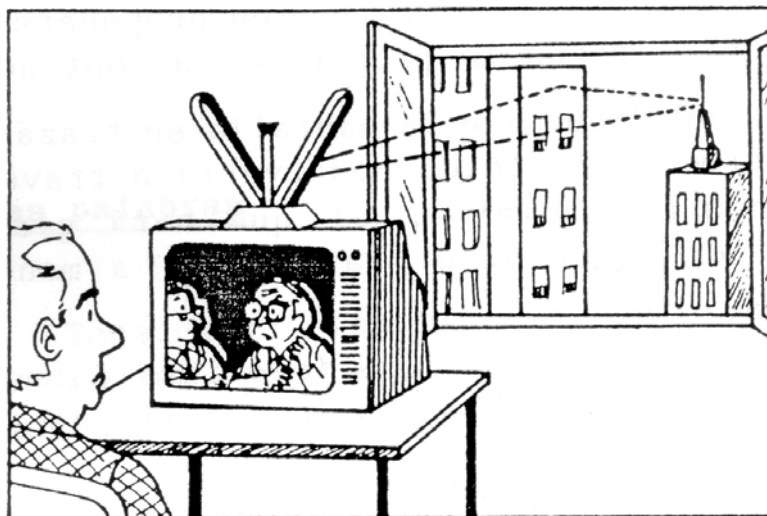
Las frecuencias, en kHz, de las principales emisoras de la República Argentina:

	kHz		kHz
LRA 1 Buenos Aires	870	LRA 17 Zapala	830
LRA 3 Santa Rosa	730	LRA 18 Río Turbio	620
LRA 4 Salta	690	LRA 19 Puerto Iguazú	1030
LRA 5 Rosario	1310	LRA 20 Las lomas	1270
LRA 6 Mendoza	960	LRA 21 Santiago del Estero	1130
LRA 7 Córdoba	750	LRA 22 San Salvador de Jujuy	830
LRA 8 Formosa	820	LRA 23 San Juan	910
LRA 9 Esquel	700	LRA 24 Río Grande	640
LRA 10 Ushuaia y Malvinas	910	LRA 25 Tartagal	540
LRA 11 Comodoro Rivadavia	790	LRA 51 Jachal	1150
LRA 12 Santo Tomé	780	LRA 52 Chos Malal	670
LRA 13 Bahía Blanca	560	LRA 53 San Martín de los Andes	1440
LRA 14 Santa Fe	540	LRA 54 Ingeniero Jacobacci	1370
LRA 15 Tucumán	1190	LRA 55 Alto Río Senguer	740
LRA 16 La Quiaca	560	LRA 56 Perito Moreno	860

### ACTIVIDAD 33

La significación de las ondas electromagnéticas puede ponerse en evidencia en muchas situaciones de interés. Proponemos un ejemplo que puede ser muy interesante para sus alumnos.

Es frecuente encontrar, sobre todo en los lugares donde hay edificios de mucha altura, un fenómeno molesto: los llamados “fantasmas” en televisión. Lo que se conoce con el nombre de fantasma no es sino el resultado de una reflexión de la onda en un edificio. De esta manera, la onda llega al televisor “en directo” pero también lo hace después de haber “rebotado” en un edificio, lo que determina un atraso con respecto a la onda original.



Este retraso puede ser valorado en la práctica. Supongamos que vemos en la punta del televisor una cara “repetida” a una cierta distancia de la figura que ha llegado en forma directa. Si se tiene en cuenta que la velocidad de la onda es de 300.000 km/seg y que una línea en televisión dura, en nuestros sistemas, 64 microsegundos, se puede estimar dónde ha “rebotado” la onda. Supongamos, por ejemplo, que el “fantasma” está desplazado 3 cm. Mediremos la longitud total de la pantalla y calcularemos qué parte del total representan los 3 cm. Si sabemos que el punto luminoso necesita 64 microsegundos para desplazarse desde el borde izquierdo hasta el borde derecho de la pantalla, podemos calcular cuál es el atraso del fantasma con respecto a la onda directa. Con este dato, podremos calcular cuántos metros de más ha recorrido la onda que llega después de un rebote.

Supongamos que el atraso sea de 5 microsegundos. ¿Cuántos metros recorre, en ese tiempo, una onda que se desplaza a la velocidad de 300.000 km/seg?

$$\begin{aligned} d &= v \cdot t. = 300.000.000 \text{ m/seg} \times 0,000005 \text{ seg} \\ &= 300 \times 5 \text{ m} \\ &= 1500 \text{ m} \end{aligned}$$

Observe que hemos cancelado seis ceros del número 300.000.000 con los seis lugares decimales del decimal correspondiente a los 5 microsegundos.

En la actividad se ha mencionado que 64 microsegundos es el tiempo que emplea el haz catódico en recorrer el ancho de la pantalla del televisor, pero no se dijo cómo se sabe que es ése el tiempo y no otro, para no introducir una dificultad adicional que prolongara el argumento. Usted puede tomarlo como dato o bien proponerse hallar ese tiempo experimentalmente, según le sugerimos a continuación.

En primer lugar, verifique que la pantalla se traza en  $1/50$  de segundo, mediante el procedimiento de observarla a través de un disco de cartón con 50 ranuras radiales, al que hará girar a la velocidad de una vuelta por segundo, o sea 60 rpm, a mano o con un pequeño motor.

Cuando el disco ranurado gire a la velocidad correcta, se verá un renglón negro en posición fija (En lo que sigue, ya no se usa ese disco).

Si observa la pantalla con atención, comprobará que la imagen está formada por 300 surcos horizontales. Ahora bien, para evitar que se note mucho el parpadeo de la imagen y para dar tiempo a que se restablezca la sustancia fosforescente excitada por el haz de electrones, el sistema de barrido hace que en una imagen los surcos queden marcados en determinados lugares y la imagen inmediatamente siguiente tenga sus surcos no en el lugar de los surcos de la imagen precedente, sino en los espacios libres que dejaban los surcos ya trazados. De esta forma, el haz incide siempre sobre sustancia fosforescente «descansada». Esto es fácil de comprobar apoyando un dedo sobre la pantalla de TV y deslizándolo lentamente hacia abajo (o hacia arriba) a una velocidad de aproximadamente un alto de pantalla cada 6 segundos. El ojo verá, entonces, surcos de una trama de la complementaria en forma alternada y sucesiva, y creará estar viendo siempre al mismo surco, que parecerá desplazarse junto con el dedo, si éste se mueve a la velocidad correcta.

De esta forma, si cada cambio de surco se produce en  $1/50$  de segundo y la pantalla completa se recorre con el dedo en 6 segundos, tendremos una cantidad de surcos igual a  $50 \times 6 = 300$  surcos, que –si todo esto se considera confuso– pueden contarse directamente sobre la pantalla y mejor sobre una fotografía de la pantalla. No obstante, igual experimente con lo descrito, aunque sólo sea por la satisfacción de percibir el efecto, aunque no se lo analice con profundidad.

El valor de 64 microsegundos sale de dividir  $7/50$  de segundo por 300 anchos de pantalla, o sea  $1/(50 \times 300) = 1/15000 = 67$  microsegundos.

La diferencia entre los 64 microsegundos mencionados y este resultado de 67, obedece a un pequeño “tiempo muerto” que el sistema emplea para funciones de sincronismo.

## En pocas palabras

Toda carga eléctrica en movimiento produce, en cada punto del espacio, un campo eléctrico variable.  
 Todo campo eléctrico variable origina un campo magnético.

Toda corriente eléctrica produce un magnético (efecto Oersted).

Todo campo magnético variable origina un campo eléctrico.



En todo conductor colocado en un campo magnético variable se produce una fuerza electromotriz inducida. La ley de Faraday establece que la fuerza electromotriz inducida en un conductor coincide (numéricamente) con la rapidez de cambio del flujo de inducción que concatena ese conductor.

$$e = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

El signo negativo del segundo miembro está relacionado con la regla de Lenz: El sentido de la corriente eléctrica inducida es tal que se opone a la causa que la genera.

Si entre las armaduras de un condensador se establece una diferencia de potencial variable con el tiempo, en el dieléctrico se crea un campo eléctrico también variable y en la zona que rodea al dieléctrico aparece un campo magnético. Por el dieléctrico no circulan cargas pero todo ocurre como si así fuera; es decir: todo campo eléctrico variable es equivalente a una corriente eléctrica (sin movimiento de cargas) que se denomina corriente de desplazamiento.

Todo campo magnético variable genera un campo eléctrico; si éste es variable, produce a su vez otro campo magnético; de esta manera es posible que se propague energía eléctrica y magnética en forma de onda: onda electromagnética.

En cada punto del espacio (aún en el vacío) por donde pase una onda eléctrica varían con el tiempo los vectores  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$ ; ambos son perpendiculares entre sí y están en fase.

A lo largo del eje Ox, por donde se propaga la onda electromagnética, se puede aplicar la ecuación de la onda a los módulos de los vectores  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$ .

$$E = E_0 \cdot \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$$

$$B = B_0 \cdot \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$$

donde T es el período de la onda (y el oscilador),  $\lambda$  la longitud de onda,  $E_0$  y  $B_0$  los valores máximos de los módulos de los respectivos vectores  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$ .

Estas ondas electromagnéticas se reflejan y se refractan en algunos medios. También se difractan al pasar por aberturas de tamaño adecuado y pueden ser polarizadas.

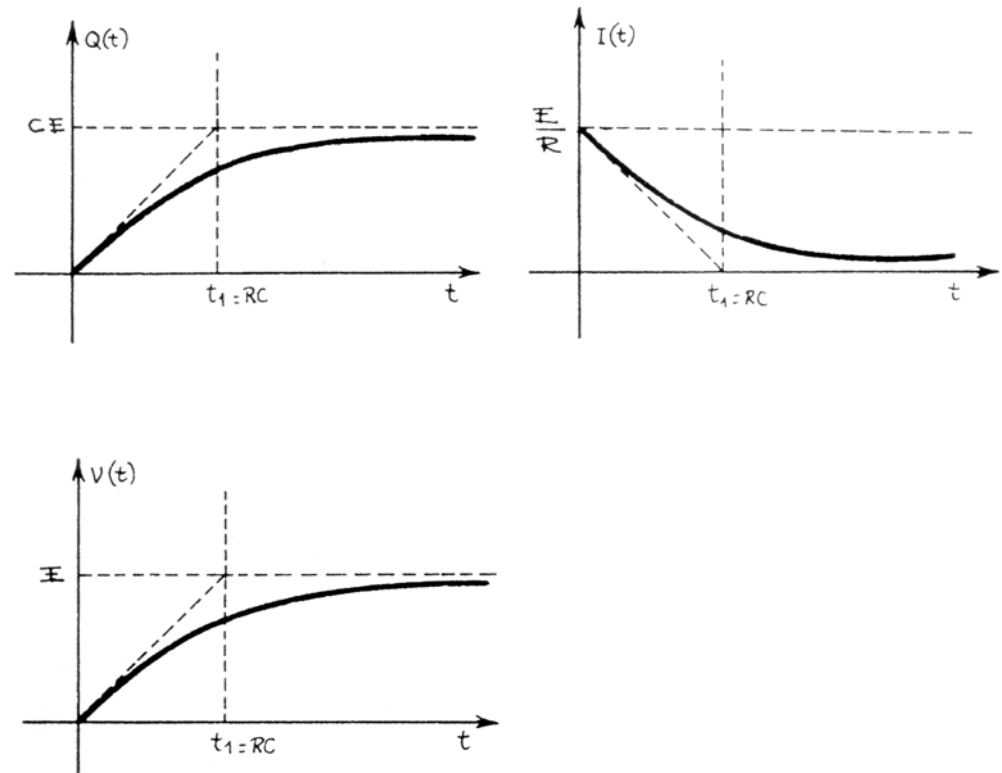




## ***CLAVE DE RESPUESTAS***

---



**Actividad 1****Actividad 2**

Circularía una corriente inicial infinita, y el capacitor se cargaría instantáneamente. En la práctica, esto no ocurre, por ser imposible de eliminar por completo la resistencia, y en los casos en que ésta se elimina por completo, por usar superconductores; tampoco crece indefinidamente la corriente, debido a los efectos de la inductancia del circuito, que no pueden eliminarse.

**Actividad 3**

$$I(t) = \frac{V}{R} \cdot e^{-t/RC}$$

$$I(0) = \frac{V}{R}$$

$$\frac{I(t)}{I(0)} = e^{-\frac{t}{RC}} = 10^{-6}; \frac{-t}{RC} = \ln(10^{-6})$$

$$\begin{aligned} t/RC &= \ln 10^6; t = RC \quad \ln 10^6 = \\ &= 100 \times 10^{-6} \text{ F} \times 12 \Omega \quad \ln 10^6 = \\ &= 10^2 \cdot 10^{-6} \cdot 12 \cdot 13,81 \\ &= 0,016 \text{ s} \end{aligned}$$

**Actividad 4**

4.1. Cuando el contacto L se cierra, se establece en los conductores del circuito una corriente de conducción.

Si en un instante la intensidad de la corriente es  $i_c = 50A$ , en el dieléctrico se tendrá una corriente de desplazamiento de igual intensidad:

$$I_D = 50 A$$

4.2. Siendo:

$$\begin{aligned} i_D &= C.d. \frac{\Delta E}{\Delta t} \\ \frac{\Delta E}{\Delta t} &= \frac{i_D}{C.d} \\ &= \frac{50.A}{4.10^{-6} F.0,001m} \\ &= 1,25.10^{10} \frac{A}{F.m} \end{aligned}$$

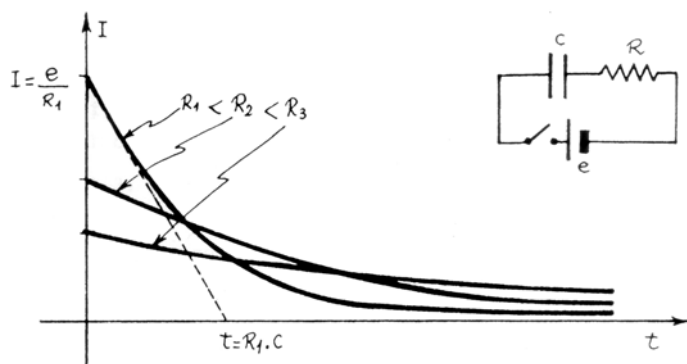
4.3. Durante el intervalo de tiempo en que se carga el condensador, no pasan cargas por su dieléctrico.

**Actividad 5**

5.1. Mayor (cuanto más grande es la resistencia, más lenta es la descarga).

5.2. Mayor.

5.3. Depende. Como la integral temporal de la corriente, es decir la carga total, es la misma, la corriente no puede ser una función monótona de la resistencia:



5.4. La misma. No sólo la integral de la corriente entre  $t = 0$  y tiempo infinito es la misma, independientemente de  $R$ , porque es la carga inicial  $Q(0)$  del capacitor, sino que también la integral de  $(I(t))^2.R$ , entre iguales límites, es la misma, independientemente de  $R$ , pues se trata de la energía inicial del capacitor,  $Q(0) \cdot V(0)$ .

### Actividad 6

6.1 y 6.2. La lámpara se ilumina cuando el destornillador está en contacto con el “polo vivo” de la red (y no se ilumina con el neutro), gracias a un efecto capacitivo: El cuerpo del operador (unido por medio de un mango conductor del destornillador al otro polo de la lámpara) hace de condensador con tierra y, gracias a su capacidad bastante elevada, permite el paso de una corriente alterna de la red.

### Actividad 7

- 7.1. Las cargas negativas están en la placa superior y las positivas en la inferior.
- 7.2. El campo eléctrico apunta hacia arriba.

### Actividad 8

- 8.1. Se pone perpendicular (recordar la campo magnético terrestre).
- 8.2. Sigue perpendicular.
- 8.3. Una corriente produce un campo magnético.

### Actividad 9

- 9.1. Cuando se mueven, recíprocamente, el imán y la bobina.
- 9.2. Se observan movimientos de la aguja, en un sentido primero y en el otro, después, cuando se producen los desplazamientos.
- 9.3. Cuando la velocidad aumenta, el fenómeno es más intenso.
- 9.4. Sucede lo mismo.
- 9.5. Un campo magnético variable produce una corriente eléctrica. Es el principio en que se basan muchos tipos de generadores eléctricos, entre ellos ése que parece un inflador y que se utiliza para hacer estallar explosivos: un engranaje recto engrana en uno circular y hace girar rápidamente un imán dentro de una bobina, y así genera una chispa eléctrica que enciende el detonador.

### Actividad 10

- 10.1. Colocar un objeto cargado electrostáticamente cerca de una aguja magnética o girar rápidamente una bobina dentro de un campo eléctrico. (No se observan efectos).
- 10.2. Se produciría un campo magnético. Ver lo que decimos acerca de la experiencia de Rowland.
- 10.3. Toda vez que una carga eléctrica se mueve, produce un campo magnético.

### Actividad 11

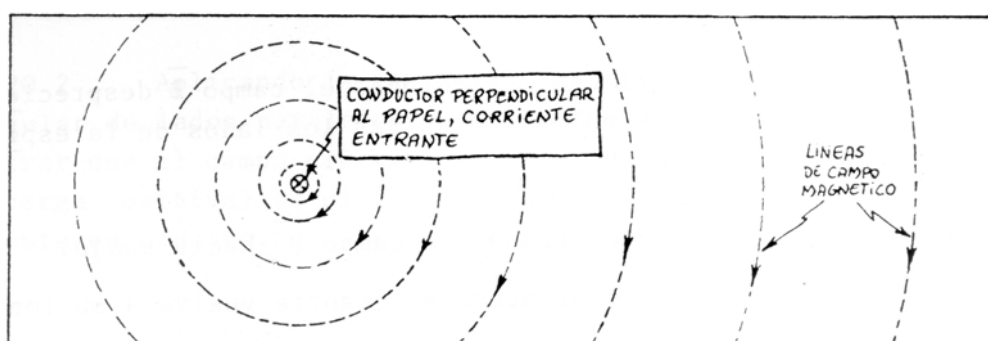
- 11.1. Cuando se abre o se cierra el circuito en la primera; pero, no mientras está cerrado o mientras está abierto o durante tiempos prolongados.
- 11.2. Que va hacia un lado y luego hacia el otro, al abrir y cerrar el circuito.
- 11.3. Una corriente que variara permanentemente en la primera

### Actividad 12

- 12.1. Es evidente que el efecto, aunque existió, no fue notado por Faraday.
- 12.2. Usó madera. El campo se hace mucho mayor con un núcleo de hierro.
- 12.3. Aumentó el número de vueltas, para hacer mayor el efecto.
- 12.4. Era un observador cuidadoso, seguía con paciencia sus hipótesis y nos dio un vivo ejemplo de lo que entendemos por método científico. Debe destacarse su insistencia, casi empecinamiento, en hallar lo que suponía debía existir, pese a las dificultades tecnológicas de su época. Por ejemplo, carecía de alambre de cobre esmaltado para bobinados, porque no se habían inventado todavía los motores eléctricos. ¡Él los inventó!

### Actividad 13

- 13.1. Son circunferencias concéntricas.



- 13.2. Una brújula gira 180°. El vector  $\vec{B}$  cambia de sentido.
- 13.3. Aumenta la intensidad del efecto.
- 13.4. Disminuye la intensidad del efecto.
- 13.5. Por medio de un vector. Puede imaginarse que cada elemento de longitud de

conductor  $d\vec{l}$  contribuye a generar un elemento de inducción  $d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}$

### Actividad 14

- 14.1. Son curvas que unen ambos polos.
- 14.2. Las espiras cortan las líneas de fuerza; o sea, varía el flujo abarcado o concatenado por la bobina, y se induce en ella una fuerza electromotriz.

$$14.3. \text{ f.e.m} = \frac{d\Phi}{dt}; \Phi = B.S. (\text{flujo})$$

### Actividad 15

1. Circula corriente creando un campo  $\vec{B}'$  hacia arriba (según la regla de la mano derecha).
2. Circula corriente creando un campo  $\vec{B}'$  hacia abajo (igual que en el caso del imán en reposo y la espira saliendo del campo).
3. No circula corriente (no hay movimiento relativo entre el imán y la espira).
4. No circula corriente, suponiendo el campo  $\vec{B}$  despreciable fuera de la zona de los polos y mientras los lados de la espira no atraviesen esta zona.

5. Circula corriente creando un campo  $\vec{B}'$  hacia abajo.
6. Circula corriente mientras el resorte vuelve a su longitud natural, creando un campo  $\vec{B}'$  hacia abajo.

### Actividad 17

A medida que el anillo desciende, concatenará más líneas de campo; así circulará corriente por él que, a su vez, generará un campo  $\vec{B}'$  hacia arriba. Se observa repulsión de frenado.

### Actividad 18

Falso. El único conductor móvil (el del cursor) no corta líneas de fuerza. Distinto sería el caso si el cursor recorriese la espiral sin interrumpir nunca el circuito.

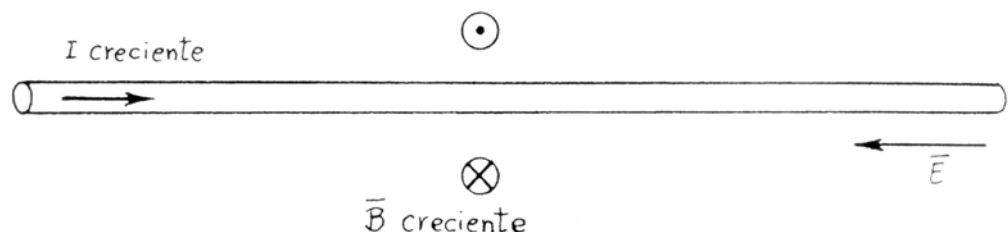
### Actividad 19

Cuando se abre un interruptor, siempre se produce un arco eléctrico que hace que se prolongue la conducción, incluso cuando los contactos ya están abiertos. La pequeña chispa que marca la apertura (o cierre) de todo interruptor es inevitable y útil. La corriente disminuye, así, menos rápidamente de lo que el funcionamiento mecánico del interruptor nos podría hacer suponer y lo suficientemente despacio como para que la fem inducida no sea peligrosa –si el interruptor está bien construido–.

### Actividad 20

20.1. Si. La corriente variable genera un campo magnético variable que induce un campo eléctrico. La simetría de revolución en torno al hilo, así como la simetría de reflexión con respecto a un plano perpendicular al hilo, muestran que el campo eléctrico inducido es necesariamente paralelo al hilo.

20.2. Aplicando la ley de Lenz a un circuito imaginario rectangular de lados paralelos y perpendiculares al hilo, se puede demostrar que el campo eléctrico (y por lo tanto, la fuerza sobre una carga positiva) se dirige en sentido inverso a la corriente, si ésta es creciente.



Por lo tanto, si se enfunda a un conductor con un caño también conductor y se unen los extremos de la envoltura para permitir el retorno de la corriente, cuando por el hilo central circula una corriente alterna, por la envoltura también circulará una corriente opuesta; y, desde afuera, se verá una corriente neta nula. Es el principio de los conductos Miniflux, útiles para instalaciones en centrales en las que se debe evitar que las corrientes de cortocircuitos accidentales generen campos demasiado intensos, que den lugar a roturas.

**Actividad 21**

21.1. Cada eje del tren barre una superficie  $S = v \cdot \Delta t \cdot \ell$  en un intervalo de tiempo  $\Delta t$ .

$\ell$  : longitud del eje

$v$ : velocidad del tren

Luego, el flujo de inducción a través de  $\Delta S$  es:

$$\Delta\Phi = B \cdot \Delta S$$

$$\Delta\Phi = 5 \cdot 10^{-5} T \cdot 15 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 1,20 \text{m} \cdot \Delta t$$

La fem inducida en cada eje, de acuerdo con la ley de Faraday es:

$$e = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

$$e = 5 \cdot 10^{-5} T \cdot 15 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 1,20 \text{m}$$

$$e = 0,0009 \text{ volt} \quad (\text{aproximadamente un milivoltio})$$

**Actividad 22**

22.1. Es nula pues el flujo de inducción a través de la espira no varía con aquellos movimientos.

22.2. La misma respuesta anterior.

22.3. Al rotar el imán se produce un cambio en el flujo de inducción que concatena la espira.

Si en un brevísimo intervalo de tiempo  $\Delta t$  el flujo de inducción varía en  $\Delta\Phi$ , la ley de Faraday establece que:

$$e = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

(No olvide que realmente es  $e = \frac{d\Phi}{dt}$ ).

de modo que  $\Delta t$  debe ser lo más pequeño posible. En un curso de 5° año, es posible que sus alumnos hayan visto derivadas en el Curso de Matemática, por lo que podrán

calcular  $e = \frac{d\Phi}{dt}$ ; en tal caso:

$$\text{Si } \Phi = \Phi_0 \cdot \cos \omega t$$

$$\text{Es } e = -\Phi_0 \cdot \omega \cdot \sin \omega t$$

de modo que usted podrá mostrarles que, en cada instante del intervalo,  $\Delta t$  se tiene un valor particular de  $e$ .



Un valor aproximado de  $e$  es:

$$e \cong \frac{B.S}{0,1s} = \frac{10^{-5} T \cdot 0,001 m^2}{0,1s}$$

$$e \cong 10^{-6} \text{ volt}$$

Lo fundamental es que los alumnos adviertan que se ha producido una fem por variación del flujo.

### Actividad 23

Acompaña el giro del imán, aunque no sea de material magnético. Ello sucede por las corrientes inducidas en el disco.

### Actividad 24

24.1. Siendo  $E = 10^{-6} \cdot \sin 2\pi \cdot 10^8 \cdot t$  (1)

Si comparamos esa expresión con:  $E = E_0 \cdot \sin \omega \cdot t$  (2)

Concluimos que  $E_0 = 10^{-6} \frac{V}{m}$

24.2. Comparando la (1) con la (2), también concluimos que:

$$\omega = 2\pi \cdot 10^8 \text{ l/s}$$

$$2\pi f = 2\pi \cdot 10^8 \text{ l/s}$$

$$f = 10^8 \text{ ciclo/s}$$

$$f = 10^8 \text{ Hz}$$

24.3. Las dos componentes, eléctrica y magnética, de la onda tienen la misma frecuencia.

24.4. La longitud de onda es:

$$\lambda = v \cdot T$$

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

$$\lambda = \frac{300.000 \text{ km/s}}{10^8 \text{ l/s}}$$

$$\lambda = 3 \cdot 10^{-3} \text{ km}$$

$$\lambda = 3 \text{ m}$$

24.5. Siendo  $E = E_0 \cdot \sin \omega \cdot t$

Es  $B = B_0 \cdot \sin \omega \cdot t$

donde  $B_0$  (valor máximo de  $B$ ) está relacionado a  $E_0$  por la expresión  $E_0 = v \cdot B_0$ , donde  $v$  es la velocidad de la luz en el medio que consideramos.

Luego

$$B_0 = \frac{E_0}{v}$$

$$B_0 = \frac{10^{-6} \text{ V/m}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}$$

$$B_0 = \frac{1}{3} \cdot 10^{-14} \text{ T}$$

Por consiguiente es:

$$B = \frac{1}{3} \cdot 10^{-14} \text{ T} \cdot \sin \omega \cdot t$$

$$B = \frac{1}{3} \cdot 10^{-14} \text{ T} \cdot \sin 2\pi \cdot 10^8 t$$

(donde  $t$  se expresa en segundos y  $B$  en tesla)

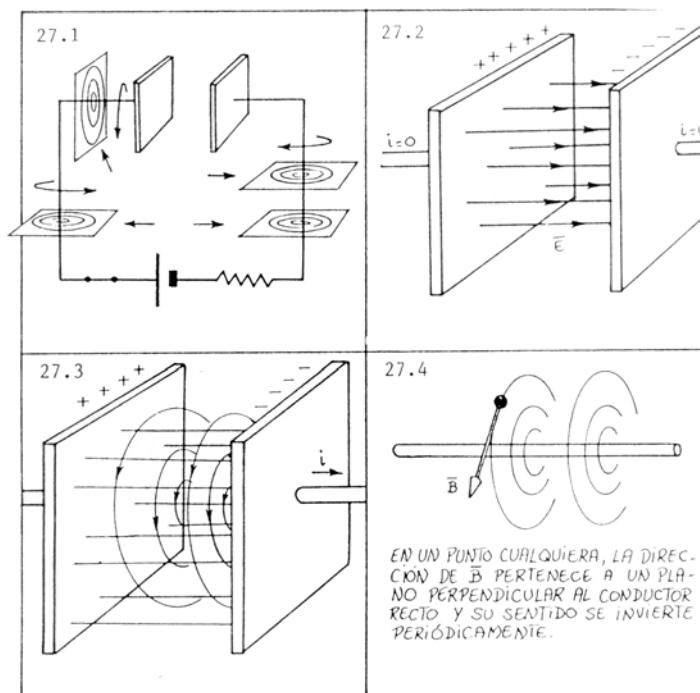
### Actividad 25

1. V
2. F
3. V
4. F
5. V
6. V
7. F
8. F
9. V
10. V

### Actividad 26

- 26.1. Un campo magnético estacionario. (sin variaciones).
- 26.2. Un campo magnético variable.
- 26.3. Una fuerza electromotriz inducida.
- 26.4. Movimientos de un imán; variación de una corriente en un conductor.
- 26.5. El campo eléctrico es variable.
- 26.6. Variable.
- 26.7. Que también deben producir campos magnéticos variables.

### Actividad 27

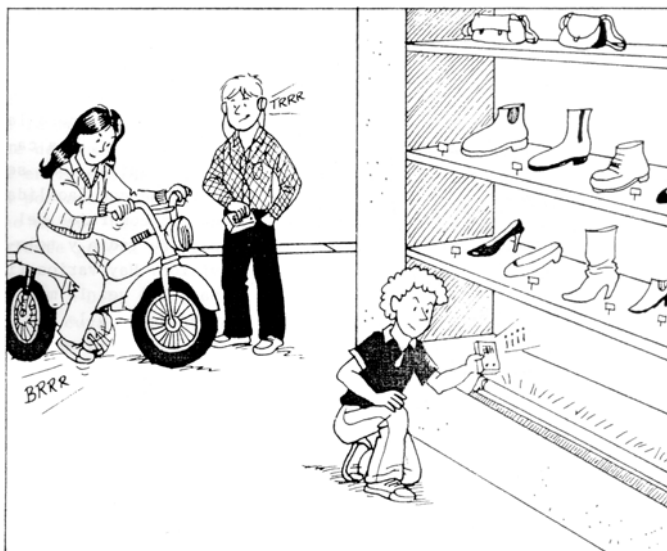


### Actividad 28

- 28.1. La dirección del campo magnético.
- 28.2. Un campo eléctrico igualmente variable.
- 28.3. Un campo magnético igualmente variable.
- 28.4. Que se producen campos magnéticos variables aunque no haya circulación efectiva de cargas; que éstos originan campos eléctricos también variables igualmente y el proceso se repite, y puede dar lugar a la propagación de una onda electromagnética.

### Actividades 29, 30 y 31

No tenemos respuesta, pues se trata de los experimentos que usted hizo. Además de las experiencias propuestas, es interesante experimentar con pequeños transmisores de radio que, probablemente, tengan sus alumnos: equipos de 27 MHz para control de aeromodelos, comunicadores “walkie-talkie”, microespías, etcétera.





**APÉNDICE.  
IDEAS Y ELEMENTOS  
PARA REALIZAR LAS ACTIVIDADES**

---



### ***Producción de un campo magnético con una corriente***

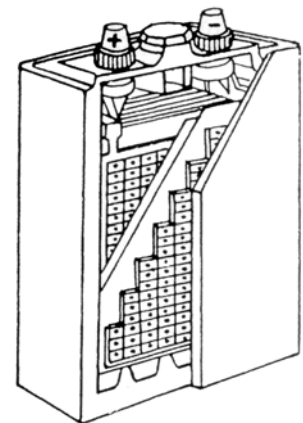
Antes de seguir adelante, deberemos recordar, una vez más, que las experiencias que se han propuesto en este módulo tienen un propósito muy definido: Llegar, con cierta rapidez, a las ideas fundamentales sobre el electromagnetismo. Por eso es que no nos detenemos demasiado en ellas o las intentamos reunir en una única sesión experimental, logrando, con ello, el propósito de situar al alumno en el conjunto de los hechos que queremos presentar.

No es difícil mostrar los efectos magnéticos de una corriente eléctrica. Lo único que se requiere, como instrumento detector, es una pequeña brújula, que se consigue con facilidad, incluso como elemento de juguete, o se puede improvisar (por ejemplo con una aguja magnética u hoja de afeitar flotando en el agua). La aguja puede ser una aguja de coser que haya sido tocada con un imán.

La magnitud de la corriente eléctrica necesaria para producir una deflexión detectable no es muy grande. Nosotros sugerimos utilizar, para las experiencias, una caja portapilas, que se consigue con facilidad en los comercios del ramo de radio y televisión. Hay varios tipos. Tal vez, la más rendidora es la que emplea seis o cuatro pilas grandes (con seis pilas tenemos nueve voltios; y, con cuatro, seis voltios). Si no se tiene una caja portapilas se puede improvisar una (No somos partidarios de estas improvisaciones, a menos que la construcción sea mecánicamente muy buena; de lo contrario, es fácil que se produzcan contactos falsos lo que crea inútiles problemas durante la experiencia).



El objetivo es disponer de una fuente de continua que pueda entregar una corriente apreciable. Por supuesto que si disponemos de un acumulador (por ejemplo un pequeño acumulador de motocicleta), los resultados serán mejores que con las pilas, porque el acumulador, aunque tenga la misma tensión en bornes (por ejemplo 6 voltios), es capaz de entregar una corriente mucho más grande, cuando es exigido. Los acumuladores son grandes y pesados, por lo general; pero, sus resultados –desde el punto de vista experimental– son muy superiores.



Para realizar la experiencia, lo único que requerimos es la fuente de continua, un pedazo de conductor y la brújula.

Conviene hacer algunas sugerencias con respecto al uso de la fuente de alimentación. Al poner un cable entre los extremos de la fuente, estamos produciendo un cortocircuito sobre ella, lo que determina que nos esté entregando la máxima corriente que está en condiciones de ofrecer. Esa corriente, en el caso de la caja portapilas, no produce ningún efecto problemático (salvo el hecho de que las pilas mismas se calienten porque la corriente circulante genera calor en sus resistencias internas).

Debe tenerse cuidado, sin embargo, si se emplea un acumulador, cuya corriente máxima puede ser muy grande. Con él debemos realizar la experiencia mediante contactos breves, muy cortos, para evitar posibles recalentamientos. Los conducto-

res utilizados con las pilas pueden ser de cualquier diámetro; pero, con los acumuladores se requieren cables de sección muy gruesa (pueden observarse los cables que se utilizan para conectar las baterías en los automóviles).

Podemos recordar, brevemente, las características de la experiencia. Si la aguja se pone paralela al conductor, cuando pasa la corriente se produce un campo que hace que la brújula se ponga perpendicular al cable. Cuanto más cerca esté ésta del conductor, más intenso será el efecto. Si está perpendicular antes del paso de la corriente, seguirá en esa posición. A medida que nos alejamos del conductor el efecto se reduce, pero puede ser detectable a distancias suficientes como para comprender la suma de dos efectos; cuando la aguja está lejos no responde solamente al campo producido por la corriente sino también por la Tierra. Si el conductor se enrolla formando una bobina, los efectos son mayores.

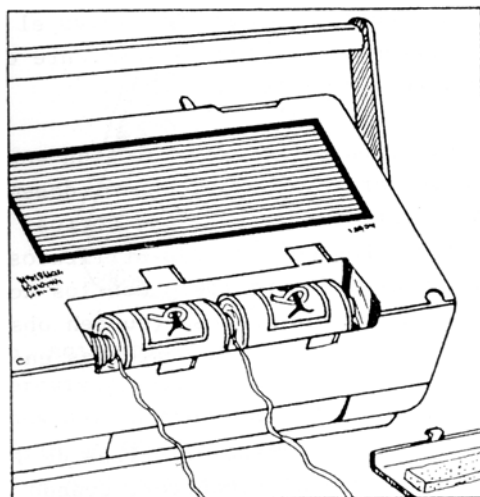
### Elementos y herramientas útiles:

- Una fuente de corriente continua que pueda entregar una corriente aceptable para la experiencia (caja portapilas, acumulador pequeño, etcétera).
- Una pequeña cantidad de conductor eléctrico (cable común envainado en plástico), suficiente como para cerrar un circuito entre los dos extremos de la fuente (algo más, si se quiere construir una bobina).
- Una pequeña brújula, comercial o improvisada (por ejemplo, con una aguja imanada). Las brújulas de burbuja de agua son especialmente sensibles.
- Una pequeña pinza de electricista, adecuada para pelar los terminales del conductor, en cada extremo.

### Sugerencias:

La experiencia se presta para que buena parte de la clase la realice en forma independiente, en forma individual o por pequeños grupos. Los elementos son de fácil obtención. Si no se consiguieran cajas portapilas, se podrán utilizar las que tienen las radios portátiles grandes (porque usan, por lo menos, cuatro pilas grandes). Los extremos del conductor, convenientemente pelados, se conectan al terminal positivo y negativo del conjunto de pilas. Puede observarse, en la figura, la forma en que se han colocado las pilas dentro de la radio y el medio que se ha empleado para conectar el conductor a ambos extremos, sin sacar las pilas de su sitio.

No debe olvidarse que los toques deben ser cortos; porque, de lo contrario, las baterías se descargan rápidamente y sueltan un líquido corrosivo que perjudicará a la radio.



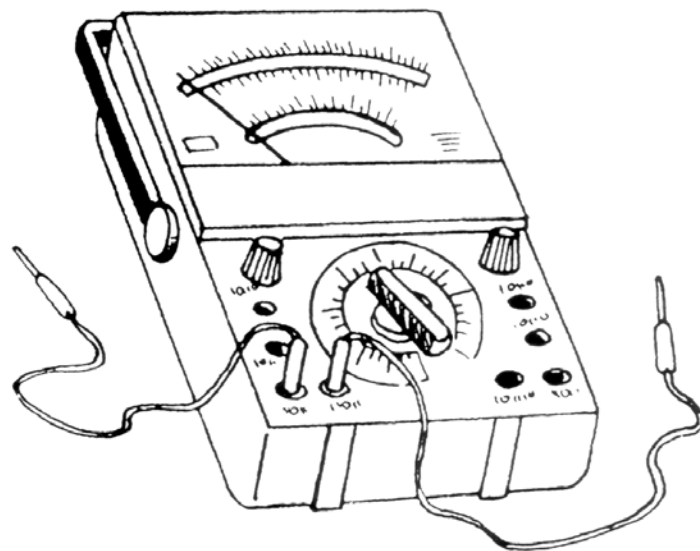


### ***Producción de una corriente eléctrica a partir de un campo magnético***

Esta experiencia ofrece mayores dificultades porque sus efectos son menos visibles. Para realizarla, necesitamos algunos elementos que se pueden conseguir con un desembolso no muy grande. En algunos casos, se trata de materiales baratos y que se fabrican en gran escala, pero que no siempre se obtienen con facilidad. Trataremos de dar algunas indicaciones.

La experiencia es la clásica demostración del efecto que produce un imán en una bobina cuando es retirado de ella o introducido en la misma. Sabemos que la variación en el campo magnético que corta los conductores determina la aparición de una corriente inducida, que un instrumento puede detectar.

Sabemos que, en los establecimientos, no siempre se consiguen elementos para la enseñanza de las ciencias. No es fácil, en todos los casos, obtener un amperímetro o un voltímetro, por ejemplo. Nosotros le sugerimos, para esta situación, un recurso que puede ser útil y no es caro.



Los técnicos en radio, televisión y electrónica usan un instrumento al que llaman “téster”. El nombre castellano y que también se usa, es multímetro. Se trata de una combinación de óhmetro, voltímetro y amperímetro, adecuada para el trabajo en los talleres del reparador. Se pueden conseguir por la suma equivalente a 25 U\$A. La suma no deja de ser reducida, si se tienen en cuenta las muchas posibilidades de trabajo que de su empleo se derivan. Puede ser utilizado en un sinnúmero de experiencias de electricidad y su uso se extiende a muchísimas aplicaciones prácticas de la vida cotidiana (por ejemplo, en simples reparaciones caseras que justifican ampliamente el gasto que el instrumento representa). Los más pequeños son también los más baratos y pueden caber en un bolsillo. No se prestan, por cierto, para el trabajo con una clase numerosa; pero, su escaso precio justifica una pequeña inversión de la Cooperadora, que puede comprar, por ejemplo, diez pequeños multímetros, con los cuales trabaja cómodamente toda una división de cuarenta alumnos. No debe olvidar, tampoco, que se trata de un elemento que le puede ser útil a usted en su vida privada; debería haber, en todas las casas, igual que pinza o martillo.

Para esta experiencia pensamos usar al instrumento como amperímetro. Es común que estos pequeños multímetros tengan una escala en la cual miden, a plena escala, 50 microamperios. En esta escala, el instrumento está conectado directamente al

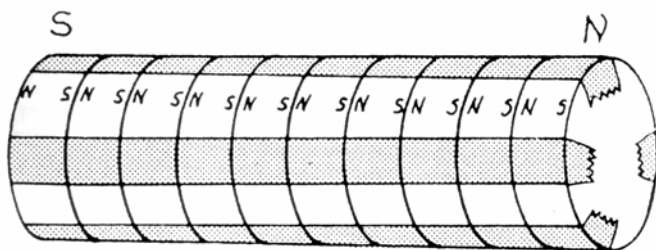
exterior. Se trata de una corriente máxima razonable para detectar los débiles efectos que aquí queremos poner en evidencia.

Necesitamos, además, una cantidad suficiente de cable como para construir una bobina. Podemos arrollar unos cuantos metros de cable recubierto de plástico, como el que se emplea en las instalaciones eléctricas; pero, también podrán conseguir los alumnos alambre esmaltado de viejos transformadores eléctricos. El alambre esmaltado tiene un recubrimiento de barniz que hace que las espiras, aunque estén juntas, no se encuentren en contacto eléctrico, porque el barniz es aislante.

La bobina puede ser armada sobre una forma cilíndrica adecuada. Para ello, conviene tener en cuenta lo que decimos de inmediato acerca de los imanes que requiere la experiencia.

Sabemos que nuestro objetivo es producir una corriente eléctrica mediante un imán que se mueve en el interior de una bobina. Es muy interesante idea armar un imán con la ayuda de los discos de cerámica magnéticos que hoy se fabrican para diversos usos (por ejemplo para cierre de puertas en muebles). Estos imanes de cerámica se fabrican en escala industrial y se pueden conseguir en librerías que se dedican a la venta de material didáctico. En efecto, estos imanes son utilizados por los maestros (en particular, los de los primeros grados) para fijar figuras en pizarras magnéticas.

Un imán como el que necesitamos para nuestra experiencia se puede fabricar adosando discos de cerámica y uniéndolos con cinta *scotch*, como muestra la figura.



También se puede usar un único imán y un trozo de hierro de tamaño apropiado. En ambos casos, el imán debe tener sus polos en caras opuestas y no del mismo lado, como ocurre en ciertos tipos que se adhieren sólo por una de sus caras. Se forma un largo imán recto, que debe entrar, de preferencia, en una bobina de diámetro más o menos similar. No debe olvidarse que la magnitud de los efectos está en relación directa con varios factores, de los cuales uno es el diámetro de la bobina.

No es éste el único tipo de imán que se puede utilizar en la experiencia. Pueden usarse también los imanes de laboratorio.

Si se tiene el imán, se construirá la bobina en relación con él. Por supuesto que necesitamos que tenga la mayor cantidad posible de vueltas. Recordemos lo que decimos en el módulo acerca de las dificultades experimentales que tuvo que sobrellevar Faraday. Si empleamos cable común, arrollaremos muchas vueltas juntas y podremos seguir el trabajo de enrollar disponiendo varias capas arriba de la primera. No hay ningún inconveniente en regresar al punto de partida después que se ha llegado a un extremo. No se olvide que siempre que la tarea se haga en el mismo sentido (arrollando hacia el mismo lado), los efectos se suman. Cuando nos referimos al arrollamiento del cable o del alambre queremos decir, simplemente, que se pueden elegir dos modos, a los cuales se puede llamar con los nombres de “en el sentido de las agujas del reloj”, “en sentido contrario a las agujas del reloj”. Cualquiera de ellos produce los mismos resultados (desde el punto de vista que aquí nos interesa).

Sabemos que la experiencia consiste en producir una corriente eléctrica, haciendo entrar y salir el imán del interior de la bobina. Sabemos, de acuerdo con las leyes de Faraday, que la magnitud del efecto depende de la mayor o menor velocidad con que se realiza la maniobra. A mayor velocidad corresponde una inducción más elevada y una corriente más grande. Los efectos son, como lo hemos señalado repetidamente, muy débiles.

Volvemos a repetir lo que dijimos con respecto al trabajo de los grupos. Siempre es buena idea orientar a los alumnos, previamente, acerca de la naturaleza de la experiencia, sugerirles los elementos necesarios, proporcionarles indicaciones básicas y, después, invitarlos para que preparen en sus casas lo necesario para trabajar.

Nuestras sugerencias acerca del uso del multímetro intentan destacar que es de suma importancia su uso en las experiencias sobre electricidad. La práctica que recomendamos puede llevarse a cabo con un galvanómetro elemental, construido con una pequeña brújula y una bobina pequeña arrollada sobre él. Sin embargo, el empleo del amperímetro permite algunas cosas más, en este caso: Se puede medir el valor de la corriente, por ejemplo cosa que instrumentos más elementales no permiten. También es de suma importancia iniciar a los alumnos en el uso del voltímetro y el óhmetro, en sus diferentes escalas, para atender otros aspectos de la enseñanza de la electricidad.

Instruya a sus alumnos en el empleo del multímetro y señáleles los peligros de intentar mediciones que pueden destruir el instrumento. Insista en la necesidad de seguir las instrucciones estrictamente.

Recuerde que la corriente producida se caracteriza porque circula en un sentido cuando el imán es retirado de la bobina y en sentido contrario cuando es introducido. Para el instrumento comercial que sugerimos, esto representa un problema, porque su aguja indicadora está ubicada en el cero de la escala. Si produce una indicación correcta en un sentido, se moverá hacia la izquierda del cero cuando el movimiento se haga en sentido contrario. Esto no es siempre grave porque se trata de corrientes muy pequeñas; pero, si se quiere evitar el movimiento “al revés” de la aguja, la solución consiste en cambiar la polaridad de los conductores.

La actividad 14 demuestra a los alumnos que un imán fijo con respecto a la bobina no produce una corriente inducida. Debe existir un movimiento relativo del imán y la bobina, para que el efecto se produzca. Es posible el movimiento de la bobina con respecto al imán o del imán con respecto a la bobina. Cualquiera de las posibilidades es válida.

### ***Producción de una corriente eléctrica a partir de otra corriente eléctrica***

Se trata de una experiencia muy interesante, cuya realización no es fácil, porque los efectos son débilmente observables. Pero, debemos recordar que tampoco Faraday detectó con facilidad los efectos que produce una corriente sobre otro circuito que no está directamente conectado con el primero.

Vamos a poner en evidencia lo que llamamos **inducción electromagnética**. Una corriente circula por un circuito. Hay un segundo circuito próximo al primero. Los efectos son tales que, en ciertas circunstancias, la corriente en el primer circuito determina la aparición de corriente en el segundo circuito.

Para realizar la experiencia, disponemos de una bobina por la cual hacemos pasar una corriente continua de una batería, conjunto de pilas, etcétera. Existe una segunda bobina

sin conexión eléctrica con la primera pero muy próxima, que está conectada al instrumento de medición. La experiencia demuestra que solamente cuando el circuito se abre o se cierra hay producción de corriente inducida, esto es, corriente en el segundo circuito. Éste es el principio de funcionamiento de los transformadores. Nosotros preferimos que el alumno realice una bobina rudimentaria y que disponga otra sobre la primera. Luego, le presentamos un transformador comercial y realizamos con él las mismas experiencias. Naturalmente, los efectos son mayores, como resultado de las diferencias constructivas; pero, el principio es el mismo. Lo que importa aquí es que el alumno ve el fenómeno en forma directa, sin interposición de algo que es, en el caso del transformador comercial, una “caja negra”. Justamente por esto resulta recomendable conseguir un transformador quemado y hacer que los alumnos lo desarmen, para ver cómo están realizados los bobinados, la manera en que se utiliza el núcleo para aumentar los efectos magnéticos, etcétera.

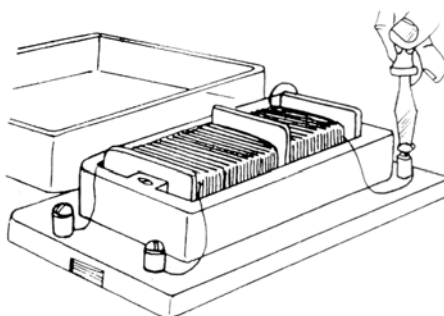
La producción de una corriente inducida no es una tarea fácil. Para detectar un efecto importante se requieren muchas vueltas de alambre y un núcleo de hierro al silicio de buena calidad. El experimento rudimentario (que conviene, a todas luces, realizar) apenas mueve una línea o dos la aguja del instrumento de 50 microamperios (ver la actividad anterior). Nosotros, en experiencias de clase, hemos arrollado dos bobinas superpuestas, formadas cada una por 5 metros de cable común envainado en plástico. Con una caja portapilas de cuatro pilas hemos conseguido desplazamientos mínimos (del orden de 1 microamperio). Naturalmente, el efecto se produce, exclusivamente, en el momento de cerrar y abrir el circuito. Los efectos se producen en sentidos contrarios. Si al cerrar el circuito la aguja se mueve en un sentido, al abrirlo lo hará al revés. Si se quiere evitar el movimiento en sentido inverso, es necesario cambiar la polaridad del téster (invirtiendo los cables).

Las bobinas han sido formadas sobre un núcleo de hierro. Para ello, se puede utilizar, siempre dentro de la idea del experimento rudimentario, un bulón de hierro. Nosotros empleamos, simplemente, una pinza pico de loro.

Sí se tiene el típico conductor doble (el que se conoce, en el mercado, como cable paralelo de dos por un milímetro cuadrado) se puede hacer un único arrollamiento, mientras se tenga la precaución de identificar correctamente los terminales. Para ello, se puede utilizar el óhmetro del mismo multímetro. De lo contrario, pueden abrirse los conductores, separando cada uno de los cables.

Parece buena idea mostrar los usos del transformador con el auxilio de las demás secciones del multímetro. Un transformador muy adecuado para completar lo que hemos aprendido puede comprarse en el mercado por una pequeña suma. Se trata de los transformadores de campanilla que convierten los 220 voltios de la línea en 6 ó 12 voltios-, por ejemplo y se emplean en muchísimas aplicaciones prácticas. Las líneas de alimentación, en la casi totalidad de los casos, son de corriente alterna. Esto significa que la corriente cambia de sentido periódicamente (al rápido ritmo de 50 ciclos por segundo). En este caso, la inducción se mantiene y aparecen tensiones sobre el secundario.

Una experiencia complementaria de la que hemos realizado es la que consiste en conectar un transformador a la red de alimentación. Para asegurar que el dispositivo no ofrezca peligros, se requiere un mínimo de habilidad práctica: la necesaria para que el cable sea unido al primario del transformador correctamente. Con una pequeña habilidad de electricista aficionado y un poco de cinta aisladora, se tendrá una unión adecuada.



Si se usan, ahora, las escalas correspondientes a la corriente alterna, los alumnos podrán medir la tensión de la línea en primer término (colocando las puntas de prueba del téster en el tomacorriente) y, luego, midiendo la tensión del secundario, en la escala adecuada.

La medición que acabamos de explicar, lo mismo que muchas otras, puede ser un interesante trabajo complementario de los que son centrales en este módulo. Nosotros los sugerimos como ejemplos de lo mucho que puede lograrse con el multímetro.

El multímetro requiere algún grado de entrenamiento para su uso correcto. En las experiencias que proponemos, los alumnos son alertados acerca de los peligros de cambiar la posición de la llave selectora, por ejemplo, en las experiencias sobre corrientes inducidas.

Luego, se les puede enseñar a medir tensiones en alterna como aquí lo recomendamos, después el uso del óhmetro, etc. Todo depende de las circunstancias y de las necesidades que se pueden presentar en el curso de la enseñanza.

Si usted no posee experiencia con estos instrumentos, le decimos que manejarlos es una tarea relativamente simple.

### ***Producción de ondas electromagnéticas***

Hemos sugerido, en el texto, el empleo de la bobina de Ruhmkorff. Éste es un elemento que se puede encontrar, con cierta frecuencia, en las escuelas. Las cajas portapilas que usamos en nuestras experiencias son capaces de hacer andar una bobina de este tipo, pero con algunas dificultades (los efectos, si bien se producen, suelen ser débiles). Las casas especializadas en la producción de materiales para laboratorios venden también fuentes de alimentación que se conectan a la red de distribución eléctrica (220 voltios de al terna) y producen 6 ó 12 voltios de continua, pero con la capacidad necesaria para entregar la alta corriente que este aparato exige. Nuestra caja portapilas también proporciona 6 voltios; pero, cuando se le exige corriente de alta medida, sus posibilidades se reducen mucho (como dicen los electricistas, "se achancha").



Hemos dicho también que las ondas pueden ser producidas con elementos más simples y de menor costo. En los comercios de electricidad se consiguen, por poco dinero (hemos pagado el equivalente de U\$S 6) campanillas eléctricas que son muy adecuadas para nuestros fines. El nombre correcto, en la jerga del comercio de electricidad, es campanilla. Las llamadas chicharras, que trabajan con alterna, no son didácticamente recomendables, porque nuestro objeto es mostrar cómo, a partir de una corriente continua que es modificada sin cesar, se producen las ondas electromagnéticas; las chicharras no interrumpen la corriente, vibran gracias a la alternancia de los 50 Hz.

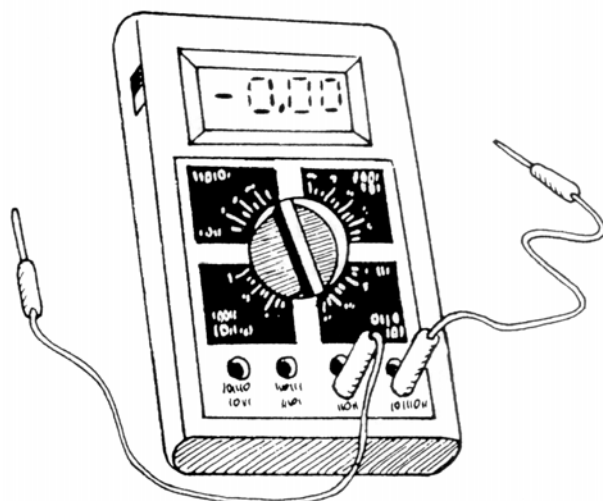
La campanilla no es otra cosa que el clásico sistema del electroimán con la lengüeta vibrante, que los alumnos encuentran en sus textos y fácilmente pueden comprender y explicar. Cuando pasa la corriente, la bobina se comporta como un electroimán, atrayendo la lengüeta y desconectando el circuito. Por elasticidad, la lengüeta vuelve a la posición anterior, reiniciando el proceso. La corriente que se produce en la bobina es, por lo tanto, una corriente variable (y muy rápidamente variable, porque hay interrupción) que genera un campo igualmente variable y, de acuerdo con Maxwell, ondas electromagnéticas.

Hemos dicho, en el texto, que resulta fácil producir ondas electromagnéticas por medios electrónicos. A veces, nos encontramos en clase con alumnos que tienen inquietudes en ese sentido o hobbies y arman simples circuitos generadores de ondas con transistores. Esto lo reflejamos en el ejemplo de la calculadora, que también produce ondas, por el simple hecho de que hay, en su interior, corrientes variables. Sin embargo, por razones didácticas que ya hemos apuntado, no nos convence la idea de producir ondas electromagnéticas sólo con los recursos de la electrónica. La campanilla que recomendamos en nuestras experiencias no es una “caja negra” dentro de la cual ocurren cosas que los alumnos no pueden comprender. Por el contrario, hay en ella elementos que son de fácil interpretación: una bobina, que está a la vista y cuyos efectos magnéticos se pueden detectar, un elemento mecánico que conecta y desconecta el circuito, etcétera. En una palabra: todo es interpretable físicamente y puede ser traducido en forma conceptual sin inconvenientes. Con cualquier oscilador electrónico podríamos realizar experiencias mucho más significativas, pero no conseguiríamos el mismo nivel de resultados en la faz formativa inicial.

En relación con el receptor, servirá una radio portátil cualquiera. Es importante que sea portátil (en la actualidad la casi totalidad de los receptores cumple con esa condición) para que no quede duda de que las perturbaciones se producen por la vía de las ondas electromagnéticas y no llegan a través del cable que proporciona la corriente.

### **El multímetro**

El multímetro o téster viene acompañado con un manual de instrucciones en el cual se detallan con mucha claridad sus diferentes usos; pero, daremos aquí algunas indicaciones que pueden orientar al profesor que no lo ha incorporado entre sus elementos didácticos. El multímetro bien ilustra lo que hoy se conoce con el nombre de “educación tecnológica general” o “educación pretecnológica”; su empleo no es ya el patrimonio de los técnicos que lo usan profesionalmente, sino que forma parte de lo que cualquier persona culta debe saber hacer.





Existen muchos instrumentos en plaza que varían ampliamente en cuanto a sus posibilidades y precio. Nosotros, para ponernos exactamente en la situación propia de la clase, hemos adquirido en un comercio del ramo el más económico de todos los instrumentos que en él se vendían (vale U\$S 30). El primer dato negativo (que nos ha impulsado a escribir estas notas) es el hecho de que las instrucciones del instrumento están en inglés.

El multímetro básico es un instrumento compuesto, que puede trabajar como óhmetro (esto es, como medidor de resistencias), como voltímetro de continua (medidor de tensiones) o de alterna. Igualmente, puede ser un amperímetro de continua. El instrumento que describimos mide resistencias en tres escalas. En una de ellas se lee "R x 1K", que se debe entender de la siguiente manera: Los valores de resistencia que se miden en la escala correspondiente (marcada "R") deben ser multiplicados por 1000 (porque 1K es abreviatura de 1 Kilo). La escala más externa del instrumento está marcada R. En un extremo se encuentra el signo que representa resistencia infinita. En el otro está el número cero. En la escala se encuentra, además, la palabra "ohms". La otra escala de resistencias está marcada "R x 10". Esto quiere decir que los valores medidos deben ser multiplicados por 10.

Si realizamos una medición de resistencias y encontramos el valor 50, por ejemplo, en la escala "R x 10", debemos entender que el valor medido es de 500 ohms. Si la escala es "R x 1K", la medición corresponde a 50.000 ohms.

El instrumento viene provisto de dos puntas de prueba, una roja y la otra negra. Para medir resistencias, la colocación de las puntas es indiferente. Una de ellas se coloca en el terminal marcado + en el cual se leen, además, V-Ω-A. La otra punta se pone en el terminal marcado -, con la abreviatura COM, que quiere decir "común". Es bueno acostumbrarse a la colocación de las puntas de una determinada manera, para evitar confusiones. El rojo se pone en el positivo (+) y el negro en el negativo (-).

Cuando se miden resistencias, se podrá observar que al colocar las puntas en cortocircuito la aguja llega hasta el cero (desplazamiento total). Si al tocar las dos puntas entre sí la aguja no llega a cero, se debe ajustar el control marcado "ohms adjustment".

Las mediciones que se pueden hacer en continua son las que corresponden a las escalas marcadas "DC" (*direct current*, o sea corriente continua). La llave selectora tiene, en nuestro instrumento, cuatro posiciones. Una de ellas dice "5". Si se busca la escala marcada "DC" que empieza en 0 y termina en 5, se podrá leer directamente en ella la tensión de continua buscada. Naturalmente, la tensión medida no debe ser mayor de 5 voltios porque, en ese caso forzaríamos al instrumento, que iría más allá del máximo, con peligro de daño. Supongamos que queremos determinar la tensión de una pila. La escala de 5 es adecuada, porque la pila tiene 1,5 voltios. Con la punta negra (negativa) tocaremos el negativo de la pila y con la punta roja el positivo. El instrumento nos medirá la tensión de la pila en circuito abierto.

La escala siguiente en continua es 25 voltios. La otra es de 125. La última es de 500 y en la misma escala está la tensión de 2,5 K, esto es, de 2500 voltios. Para medir hasta 2500 voltios se debe hacer un cambio: la punta roja es colocada en el terminal marcado + 2,5 K. Esto ocurre en nuestro instrumento, no todos son totalmente iguales.

La medición de una tensión en continua al revés (cambiando positivo con negativo) determina el movimiento de la aguja en sentido contrario al de desplazamiento normal (se mueve hacia atrás). Esto no es bueno porque podría estar circulando corriente intensa y no nos percataríamos. Lo recordamos porque la medición de corrientes en continua también tiene la misma característica: si se invierte la polaridad de medición determina el movimiento de la aguja al revés. En la experiencia de las corrientes

inducidas, por ejemplo, podemos conseguir, en las condiciones que hemos fijado para trabajar, un mínimo desplazamiento de la aguja en la escala marcada “50  $\mu$ A”. (Esto es, 50 microamperios). Ese desplazamiento se produce en un sentido y luego en el otro, en el momento de abrir o cerrar el circuito.

En nuestro instrumento se pueden medir las corrientes continuas en dos escalas. Una de ellas es la de 50 mA, que ya mencionamos. La otra es de 250 mA (250 miliamperios). Los valores se registran en las mismas escalas que se usan para medir tensiones continuas. Obsérvese que una escala que termina en el número 25 sirve para medir 250 miliamperios con un empleo adecuado de las proporciones.

Las tensiones alternas se miden en las escalas rojas y en los puntos que determina la llave selectora como ACV (*alternating current voltage*). Caben las mismas indicaciones que hemos hecho con respecto a las otras mediciones. Las tensiones alternas no tienen polaridad. Si queremos determinar la tensión de la red de alimentación de electricidad usaremos las escalas de alterna (escalas rojas) pero las puntas de prueba se conectarán, indistintamente, a cualquiera de las dos terminales del tomacorriente.

Jamás conecte a un enchufe los cables del multímetro sin previamente cerciorarse de que la llave selectora está en ACV 250.

La totalidad de los instrumentos tiene, además, escalas y terminales aptos para la medición de decibelios. El ajuste en la situación de reposo de la aguja puede demandar ligeros toques en un tornillo preparado para este efecto (observar el diagrama del multímetro). Basta con tocarlo ligeramente para que la aguja se acomode en la posición correspondiente al comienzo de la escala.

Insista, ante sus alumnos, en la necesidad de seguir estrictamente las instrucciones en el uso de los instrumentos. El empleo en escalas inadecuadas puede dañarlos irremediablemente.

Consúltenos. Estamos para resolver todas las dudas que puedan presentársele, aun las más pequeñas. Realice las experiencias previamente, para asegurarse de que ningún detalle pueda hacerlas fracasar.

Si el fracaso se produce, aprovéchelo inteligentemente; diga con franqueza qué es lo que esperaba que se produjese y no se produjo; los hombres de ciencia tuvieron siempre más fracasos que éxitos, antes de llegar a los resultados que buscaban.



## **Bibliografía**

---

### **Nivel secundario:**

- Blackwood y otros. *Física General*.. CECSA.
- Bueche. *Fundamentos de Física*. Mc Graw Hill. México, 1970.
- Stolberg y Hill. *Física. Fundamentos y fronteras*. Publicaciones Cultural SA. México, 1967.
- Fernández y Galloni. *Física*. Nigar SRL. 979. Tomo II.
- Maiztegui y Boido. *Física elemental*, Kapelusz, 1981.
- Castiglione, Perrazo y Rela. *Física*. Plus Ultra, 1983.

### **Nivel terciario:**

- Tipler. *Física*. Reverté. 1977. Tomo II.
- Alonso y Finn. *Física*. Fondo Educativo Interamericano SA. 1971. Tomo II.
- Resnik y Halliday. *Física*. CECSA. 1977. Tomo II.

### **Complementarios:**

- Levy-Leblond. *La física en preguntas*. Alianza. 1984