FÍSICA 2º DE BACHILLERATO

TEMA 5: ELECTROMAGNETISMO

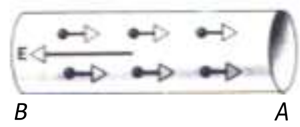
3. Inducción electromagnética

Autor: Luis A. Cordón Montón
Catedrático de Física y Química
IES “Sancho III el Mayor” (Tafalla)

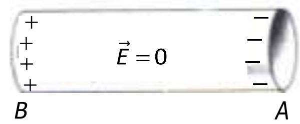
3. INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

3.1. Fundamentos básicos de los circuitos de corriente eléctrica

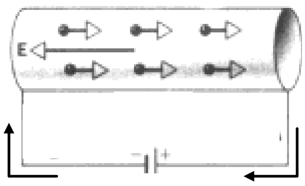
3.1.1. Introducción



Como ya hemos visto en el estudio de la interacción magnética, al crear un campo eléctrico en el interior de un conductor, como ilustra la figura, actúa una fuerza sobre los electrones libres que les comunica un movimiento[1] en la dirección del campo pero en sentido opuesto; es decir, se genera una corriente eléctrica. Un campo eléctrico dirigido a lo largo del conductor de la figura significa que hay una diferencia de potencial $V_A - V_B$ entre sus extremos. Y si los electrones se mueven de izquierda a derecha[2] es porque $V_A > V_B$.



Ahora bien, a medida que los electrones se mueven, se van apiñando en el extremo derecho del conductor (y los huecos positivos que dejan los electrones se colocan en el lado izquierdo), como ilustra la figura. La consecuencia de esto es que el potencial del lado derecho del conductor va disminuyendo y el del lado izquierdo va aumentando. Llega un momento en el que los potenciales se igualan y, en consecuencia, el campo eléctrico desaparece. Al anularse el campo, la fuerza eléctrica deja de actuar y la corriente cesa. Para que la corriente eléctrica se mantenga durante un intervalo de tiempo apreciable necesitamos un artificio que sea capaz, no solo de crear una diferencia de potencial, sino también de mantenerla "recogiendo" los electrones que llegan al extremo derecho del conductor y "bombeándolos" al extremo izquierdo, lo que requiere energía. Este dispositivo se denomina ***generador eléctrico*** y está ilustrado en la figura. Las pilas convencionales, los alternadores de los automóviles y las células solares son ejemplos de generadores. Los generadores eléctricos transforman un determinado tipo de energía en energía eléctrica. La energía transformada es química en las pilas, cinética en los alternadores y luminosa en las células solares.



Generador

Al contrario que los generadores, los ***receptores eléctricos*** son dispositivos que transforman la energía eléctrica en otro tipo de energía. Un conductor que ofrece una resistencia apreciable al paso de la corriente, un motor y un acumulador eléctrico cuando se recarga son ejemplos de receptores. La energía que transforman es térmica en las resistencias, mecánica en los motores y química en los acumuladores.

3.1.2. Ley de Ohm

Sea un conductor por el que circula una corriente eléctrica, como se ve en la figura. El Físico alemán G.S. Ohm (1787-1854) estudió experimentalmente la relación que existe entre la diferencia de potencial entre los extremos de un conductor metálico y la intensidad de corriente que circula por él. Encontró que si se aplican a los extremos de un mismo conductor distintas diferencias de potencial ΔV_1, ΔV_2, ΔV_3,

[1] Recuerda que al ser los electrones cargas negativas, la fuerza actúa en sentido opuesto a la intensidad del campo; esto es, los electrones se mueven en sentido opuesto al campo.

[2] Recuerda que las cargas negativas en un campo eléctrico se mueven espontáneamente en el sentido de los potenciales crecientes.

… y se obtienen las intensidades i_1, i_2, i_3, …, se cumple que,

$$\frac{\Delta V_1}{i_1} = \frac{\Delta V_2}{i_2} = \frac{\Delta V_3}{i_3} = \ldots = cte$$

La generalización de estos resultados es la ***ley de Ohm*** que se puede enunciar así, *El cociente entre la diferencia de potencial* ΔV *en los extremos de un conductor y la intensidad* i *que circula por el mismo es constante.* Matemáticamente,

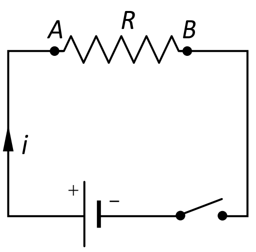
$$\boxed{R = \frac{\Delta V}{i}} \quad (1)$$

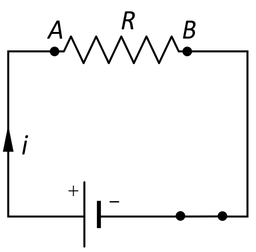
donde R es la constante de proporcionalidad, que se llama ***resistencia eléctrica del conductor***. Como en el S.I. la diferencia de potencial se mide en V y la intensidad en A, la unidad de la resistencia es el V/A que recibe el nombre de ***Ohmio*** (Ω); esto es, $1\Omega = 1V/1A$. Por lo tanto, *la resistencia de un conductor es de* 1 Ω *cuando al aplicar en sus extremos una* diferencia de potencial *de* 1 *V, circula por el mismo una intensidad de* 1 *A*.

De acuerdo con la ley de Ohm, para una diferencia de potencial fija, al aumentar la resistencia de un conductor disminuye la intensidad que fluye por él; es decir, el conductor ofrece una oposición mayor al flujo de cargas. Por lo tanto, *la resistencia de un conductor no es más que una medida de la oposición que dicho conductor presenta al paso de la corriente eléctrica a través de él*.

Los electrones son las partículas portadoras de carga que se mueven en los conductores metálicos. Entre los átomos fijos que forman la red del metal y los electrones en movimiento se producen colisiones que dificultan el avance de los mismos. Esta oposición al paso de la corriente es la causa de la resistencia.

3.1.3. Circuito básico de corriente de corriente eléctrica





Un circuito eléctrico elemental es el formado por un generador, una residencia, un interruptor y dos conductores que conectan el generador a la resistencia a través del interruptor. Su representación esquemática es la mostrada en las figuras.

Por el circuito de la figura superior no pasa corriente porque el interruptor está en posición de "desconectado". Ya que el interruptor en este estado "rompe" el circuito, se dice que dicho circuito está ***abierto***. Un interruptor en posición de "conectado" cierra el circuito permitiendo que circule la corriente; entonces el circuito está ***cerrado***, como ilustra la figura inferior.

El punto A del circuito tiene un potencial mayor que el punto B porque está conectado al ***polo*** positivo del generador; por lo tanto, las cargas negativas impulsadas por el campo eléctrico, se desplazan en el sentido de B a A (sentido de los potenciales crecientes). Esta clase de corriente, en la que las cargas se mueven siempre en un mismo sentido recibe el nombre de ***corriente continua***. Cuando las cargas se mueven alternativamente en un sentido y en otro se tiene la ***corriente alterna***. Los circuitos electrónicos e informáticos, los de los automóviles y los de los juguetes eléctricos son ejemplos de corriente continua. La electricidad que suministran las compañías eléctricas a empresas y viviendas es un ejemplo de corriente alterna. En este tipo de corriente los electrones cambian su sentido de movimiento 50 veces por segundo, por ello su frecuencia es de 50 Hz. Un circuito es de

corriente continua constante cuando la intensidad *i* que pasa por el mismo es siempre la misma.

> Nota en las figuras de la página anterior que el sentido de la intensidad, representado por la punta de flecha, es de *A* a *B*; es decir, opuesto al real. La razón es que, por razones históricas, estamos utilizando el sentido convencional de la corriente, que es el que tendrían las cargas positivas si fueran ellas las que se movieran.

3.1.4. Transferencias de energía en un circuito eléctrico

Recuerda que en el estudio del campo eléctrico vimos que el trabajo que éste realiza cuando una carga Δq se mueve espontáneamente entre dos puntos *A* y *B* es,

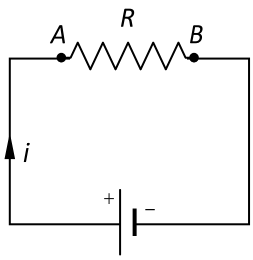
$$W_A^B = E_p(A) - E_p(B) > 0 \;\Rightarrow\; E_p(A) > E_p(B)$$

lo que significa que Δq pierde parte de su energía potencial al llegar a *B*. Por otro lado, la relación entre el potencial en un punto del campo y la energía potencial que adquiere la carga Δq colocada en ese punto es,

$$E_p = \Delta q V$$

por lo que, combinando ambas ecuaciones, llegamos a,

$$W_A^B = \Delta q\left(V_A - V_B\right)$$



Consideremos el circuito de **corriente continua cerrado** mostrado en la figura, en el que la diferencia de potencial creada por el generador en los extremos de *R* ($V_A - V_B$) es constante. Sea W_A^B el trabajo realizado por el campo eléctrico cuando una cantidad de carga Δq entra en *R* por el punto *A* y sale por el *B*[3]; como Δq pierde energía potencial al llegar a *B* y el trabajo no es más que una forma de transferir energía, concluimos que W_A^B representa también la energía transferida por el generador (que es el que crea el campo) a *R* (energía que se disipa en forma de calor porque *R* se calienta).

De la última ecuación se deduce que,

$$W_A^B = \Delta q\left(V_A - V_B\right) \;\Rightarrow\; V_A - V_B = W_A^B / \Delta q$$

lo que significa que $V_A - V_B$ expresa la energía suministrada por el circuito a la resistencia por unidad de carga[4].

Aplicando la ley de Ohm a los extremos de *R* tenemos que $i = V_A - V_B / R = cte$ ya que $V_A - V_B$ y *R* son constantes; lo que significa, al aplicar la definición de *i* que se vio en el punto 1.1.3 de interacción eléctrica,

$$i = \Delta q / \Delta t \quad \text{(solo si } I \text{ es constante)}$$

Combinando las dos últimas ecuaciones llegamos a,

---

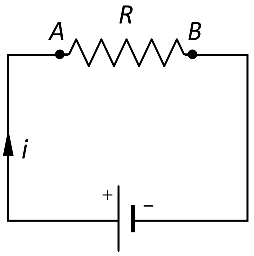
[3]Observa que *R* es un conductor con cargas libres que se mueven por la acción del campo eléctrico. Como la carga circula por *R* pero no se almacena, si la carga Δq entra en *R* por el punto *A*, la misma cantidad tiene que salir por *B*.

[4]Nota que, al ser $V_A - V_B = cte$, la energía suministrada es directamente proporcional a la carga.

$$\left.\begin{aligned} W_A^B &= \Delta q\left(V_A - V_B\right) \\ i = \Delta q/\Delta t &\Rightarrow \Delta q = i\,dt \end{aligned}\right\} \Rightarrow W_A^B = \left(V_A - V_B\right) i\,\Delta t \Rightarrow \frac{W_A^B}{\Delta t} = \left(V_A - V_B\right) i = cte$$

Recordando que, como vimos en el tema 1, la potencia (P) es la energía transferida por unidad de tiempo y que cuando es constante se cumple que $P = W/\Delta t$,

$$\left.\begin{aligned} \left(V_A - V_B\right) i &= W_A^B/\Delta t \\ P &= W_A^B/\Delta t \end{aligned}\right\} \Rightarrow \boxed{P = \left(V_A - V_B\right) i = \Delta V\, i} \quad (2)$$

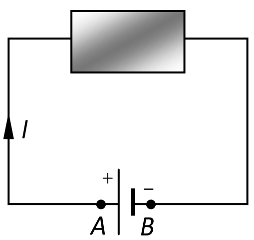


ecuación que expresa la potencia en función de ΔV e i y que prueba que es constante (siempre que ΔV sea constante).

Finalmente, la aplicación de la ley de Ohm permite expresar la ecuación (2) como,

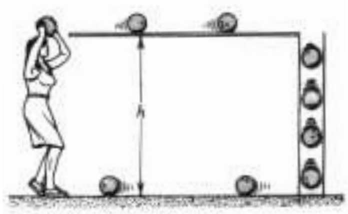
$$\left.\begin{aligned} i = \Delta V/R \Rightarrow \Delta V &= iR \\ P &= \Delta V i \end{aligned}\right\} \Rightarrow \boxed{P = i^2 R} \quad (3)$$

Hemos visto que para mantener la corriente en el circuito es necesario que se "bombeen" hasta el punto A las cargas que, procedentes del punto B, llegan al terminal negativo del generador. Ahora bien, ese bombeo requiere que se comunique a las cargas la energía potencial que han cedido a R. Es el propio generador el que, a costa de su propia energía interna, comunica a las cargas la energía perdida. Obviamente, cuando la energía del generador se agota la diferencia de potencial desaparece y la corriente cesa.



Hemos dicho que un ***receptor eléctrico*** es un dispositivo que transforma la energía eléctrica en otro tipo de energía. Un conductor con resistencia, un motor o una batería eléctrica cuando se recarga son ejemplos de receptores. La energía que transforman es térmica en las resistencias, mecánica en los motores y química en las baterías. En el circuito de la figura la "caja negra" representa un receptor
La ecuación (2) es válida sea cual sea el receptor, pero solo en circuitos de corriente continua constante.
Si el receptor es una resistencia, las ecuaciones (1), (2) y (3) son de validez universal (intensidad constante o variable, lo que incluye la corriente alterna). Para demostrarlo es suficiente con repetir el razonamiento seguido considerando una cantidad de carga infinitesimal dq y utilizar la ecuación general de intensidad de corriente $i = dq/dt$.

Analogía mecánica de un circuito eléctrico



El símil mecánico ilustrado en la figura nos ayudará a comprender las transferencias de energía *en el caso particular de un circuito con generador y resistencia*. Una persona levanta unas bolas sobre una estantería, efectuando un trabajo sobre ellas y transfiriéndoles energía potencial gravitatoria (a costa de su propia energía interna). Las bolas ruedan lentamente por la misma, cayendo hasta el fondo de un cilindro con aceite viscoso que, por el rozamiento que ejerce, no permite que aceleren; esto es, mantiene la energía cinética de las bolas constante en un valor muy pequeño (despreciable). La energía suministrada al sistema aparece al final como energía interna del fluido viscoso, dando como resultado una elevación de la temperatura del mismo. En el símil la persona juega el papel del generador, el fluido es la resistencia y las bolas son las cargas que transfieren la energía.

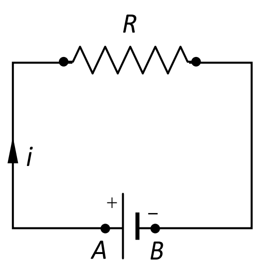
3.1.5. Fuerza electromotriz de un generador. Ley de Ohm generalizada

Un ***generador*** es un dispositivo capaz de transformar ciertos tipos de energía en energía eléctrica, que transfiere al circuito eléctrico al que está conectado. Viene caracterizado por su ***fuerza electromotriz*** (*fem*) y su ***resistencia interna*** (*r*). Los generadores se pueden clasificar atendiendo a la clase de energía que son capaces de transformar en los siguientes grupos:

- ***Mecánicos***, transforman energía mecánica. Por ejemplo, la dinamo de una bicicleta o un generador eólico.
- ***Químicos***, transforman energía química; esto es, energía liberada de una reacción química. Se denominan ***acumuladores eléctricos*** o ***baterías***. Por ejemplo, la batería de un coche o la de una linterna.
- ***Solares***, transforman energía luminosa. Por ejemplo, una célula fotovoltaica.

La ***fuerza electromotriz*** ε *de un generador es la cantidad de energía que es capaz de transformar en energía eléctrica por unidad de carga.*

Su unidad en el S.I. es el voltio, ya que, al igual que la diferencia de potencial, es una energía por unidad de carga.



En el circuito de la figura, los portadores de carga, impulsados por el generador, recorren el circuito y atraviesan la resistencia y el propio generador. Ahora bien, la experiencia prueba que el generador se calienta cuando las cargas pasan a través de él; esto es, se comporta como una resistencia, presentando una oposición al paso de la corriente. Si representamos por *r* su resistencia interna, ha de cumplirse que la energía transferida por la corriente al propio generador por unidad de tiempo en forma de energía térmica es $i^2 r$, expresión que puede comprobarse experimentalmente. Por otro lado, si la diferencia de potencial en los extremos de generador es $V_A - V_B$, la intensidad *i* y no hay pérdidas de energía en los cables, sabemos que la energía transferida a la resistencia *R* por unidad de tiempo es,

$$(V_A - V_B)\,i = i^2 R$$

Sea un generador de *fem* constante, lo que significa que $V_A - V_B$ e *I* también son constantes. Aplicando la definición de *fem* se deduce, en este caso particular, que si la energía *W* suministrada por el generador cuando la cantidad de carga Δq sale por el terminal positivo del generador (y, por lo tanto, entra por el negativo), su *fem* viene dada por,

$$\varepsilon = W/\Delta q \;\Rightarrow\; W = \varepsilon\,\Delta q \text{ (solo si } \varepsilon \text{ es constante)}$$

Nota que, al ser *I* constante, tenemos que $\Delta q = I\,\Delta t \;\Rightarrow\; \Delta q \propto \Delta t$ y como $W \propto \Delta q$ (al ser ε constante), se deduce que $W \propto \Delta t$. Entonces, al *W* proporcional a Δt, la energía que transfiere al circuito por unidad de tiempo (o sea, su potencia) queda expresada por,

$$P = \frac{W}{\Delta t} = \frac{\varepsilon\,\Delta q}{\Delta t} = \varepsilon\frac{\Delta q}{\Delta t} \;\Rightarrow\; \boxed{P = \varepsilon\, i} \quad (4)$$

Por otro lado, la energía cedida por el generador por unidad de tiempo, de acuerdo con el principio de conservación de la energía, ha de ser igual a la disipada por el propio generador más la transferida a la resistencia; por lo tanto,

$$\varepsilon\, i=(V_A-V_B)\,i+i^2 r \;\Rightarrow\; \varepsilon=(V_A-V_B)+ir$$

que expresa la relación existente entre la *fem* del generador, la diferencia de potencial entre sus extremos, la intensidad y su resistencia interna.

Nota que si la resistencia interna del generador r es despreciable, se cumple que,

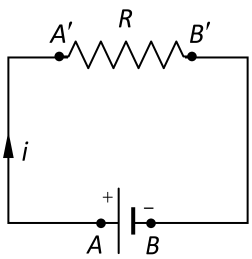
$$\varepsilon=(V_A-V_B)=i\,R$$

es decir, que la *fem* coincide con la *ddp* entre los extremos del generador, aunque se trata de conceptos diferentes.

Finalmente, al aplicar la ley de Ohm, tenemos que,

$$\left.\begin{aligned}\varepsilon=(V_A-V_B)+ir\\ V_A-V_B=iR\end{aligned}\right\} \;\Rightarrow\; \boxed{i=\frac{\varepsilon}{R+r}} \quad (5)$$

que recibe el nombre de **ley de Ohm generalizada** en el caso particular de que los únicos receptores del circuito sean resistencias. En realidad R representa la resistencia equivalente del circuito, excluida la interna del generador r.



Observa el circuito de la figura. Al aplicar la ley de Ohm entre los puntos A y A',

$$V_A-V_{A'}=iR_c$$

donde R_c representa la resistencia del cable que conecta A y A'. Como la resistencia de los cables es muy pequeña frente a la de la resistencia R, la podemos despreciar, así que,

$$R_c\approx 0 \;\Rightarrow\; V_A-V_{A'}=iR_c\approx 0 \;\Rightarrow\; V_A\approx V_{A'}$$

y aplicando el mismo razonamiento al cable que conecta B y B', llegamos a que $V_B\approx V_{B'}$; así que,

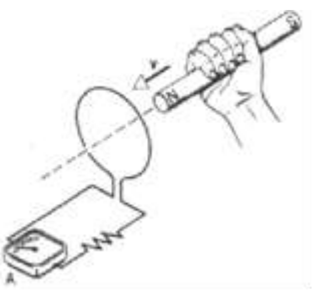
$$V_A-V_B\approx V_{A'}-V_{B'}$$

es decir, la diferencia de potencia en los extremos de R y del generador coinciden si la resistencia de los cables es despreciable.

3.2. Experiencias de Faraday y Henry

En la parte 2ª del tema (Interacción magnética) hemos visto que una corriente eléctrica es capaz de crear un campo magnético. Nos preguntamos si también sería posible el efecto contrario; esto es, que un campo magnético cree una corriente eléctrica.

Los experimentos realizados por Michael Faraday (1791-1867) en Inglaterra y Joseph Henry (1797-1878) en Estados Unidos en 1831, casi al mismo tiempo[5], concluyeron que, efectivamente, un campo magnético es capaz de crear una corriente eléctrica. Vamos a describir a continuación algunos de esos experimentos.

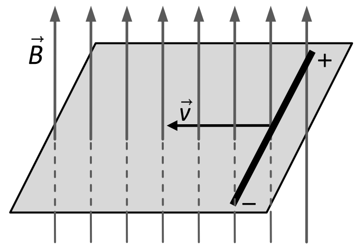


La figura muestra una espira de alambre conductor de la corriente eléctrica como parte de un circuito que contiene un ***amperímetro***[6]. Normalmente cabría esperar que éste no mostrase corriente en el circuito, porque no parece que exista una fuente de fuerza electromotriz. Sin embargo, si desplazamos un imán recto hacia la espira, con su polo norte encarado a la misma, ocurre un fenómeno notable. *Al*

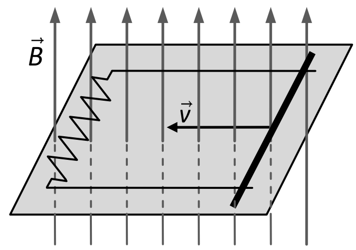
[5] El primero en publicar los resultados fue Faraday.

[6] Aparato que mide la intensidad de corriente.

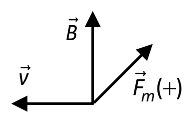
mover el imán, la aguja del amperímetro se mueve, demostrando con ello que pasa una corriente por la espira. Si mantenemos el imán estacionario con respecto a la espira, el amperímetro no marca. Si movemos el imán *alejándolo* de la espira, la aguja muestra de nuevo una desviación, pero ahora en el sentido opuesto. Si usamos el extremo del polo sur del imán en lugar del norte, el experimento funciona como se ha descrito, pero la desviación de la aguja se invierte. Cuanto más aprisa se mueve el imán, mayor es la intensidad de la corriente que registra el amperímetro.



Por su parte, Henry comprobó que al mover un conductor rectilíneo perpendicularmente a un campo magnético (ver figura) aparece en los extremos del conductor una diferencia de potencial. De modo que si cerramos el circuito (por ejemplo, conectando el conductor a una resistencia mediante dos guías metálicas por las que se desliza, como se ve en la figura inferior, la diferencia de potencial creada en el conductor genera una corriente eléctrica que fluye a través de la resistencia.



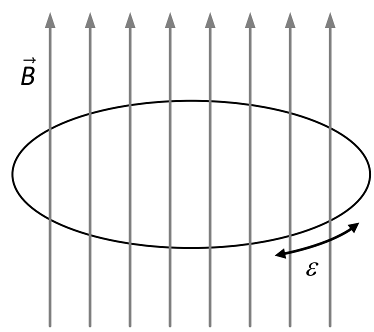
Los experimentos demuestran que lo que importa es *el movimiento relativo entre el cuerpo que crea el campo magnético y el circuito eléctrico*. No existe ninguna diferencia en que movamos uno u otro. La corriente que aparece en estos experimentos se llama ***corriente inducida*** y se dice que se origina por una ***fuerza electromotriz inducida***. Faraday y Henry dedujeron a partir de experimentos similares al descrito la magnitud de la *fem* inducida.



Una vez observados los hechos, se trata de formular hipótesis que los expliquen. Podemos interpretar el fenómeno de la inducción como una consecuencia de la ley de Lorentz. En efecto, tanto en las experiencias de Faraday como en las de Henry, hay un movimiento relativo de las cargas móviles de un conductor eléctrico (electrones libres) en el seno de un campo magnético. Por lo tanto, de acuerdo con la ley de Lorentz, las cargas móviles del conductor están sometidas a una fuerza (ver figura) dada por,

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

que las hace moverse en el interior del conductor, siendo esta fuerza la responsable de la corriente inducida.



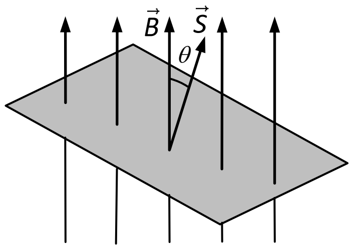
Cuando un conductor se mueve en el interior de un campo magnético hemos podido interpretar el fenómeno de la inducción como una consecuencia de la ley de Lorentz. Sin embargo, no siempre se puede interpretar la corriente inducida de este modo. Consideremos un conductor cerrado (en forma de espira circular, por ejemplo) en reposo en el interior de un campo magnético *variable en el tiempo*[7], tal como ilustra la figura. Experimentalmente se comprueba que se induce una *fem* en la espira (ésta desaparece si el campo magnético se mantiene constante). En este caso *no hay movimiento relativo* del conductor respecto al campo magnético y no podemos, por tanto, explicar la inducción con la ley de Lorentz.

[7] Un conductor por el que circula una intensidad de corriente variable (esto es, que depende del tiempo) crea un campo magnético cuyo valor, en cada punto del espacio es también variable; es decir, función del tiempo. Ello se debe a que la intensidad del campo magnético en cada punto es función de la intensidad de corriente.
Un campo magnético puede ser variable en el tiempo y constante en el espacio. Esto sucede cuando el campo tiene el mismo valor en todos los puntos del espacio, pero varía de un instante a otro, como el representado en la figura.

3.3. Flujo magnético. Leyes de Faraday y Lenz

3.3.1. Flujo magnético.

Las experiencias de Faraday y Henry les llevaron a concluir que siempre que en un circuito cerrado en el interior de un campo magnético se induce una *fem* es porque en él hay una variación de una magnitud relacionada con el campo magnético, denominada *flujo magnético*.



La figura muestra una superficie plana de área S en el interior de un campo magnético uniforme. El vector $\vec{S}$ (perpendicular a la superficie y cuyo módulo coincide numéricamente con al área de la misma) forma un ángulo φ con $\vec{B}$.

Por analogía con el campo eléctrico, se define el ***flujo magnético*** (Φ) del campo uniforme $\vec{B}$ a través de la superficie plana S como,

$$\Phi = B\,S\cos\theta$$

que no es más que el producto escalar de $\vec{B}$ y $\vec{S}$. Esto es,

$$\boxed{\Phi = \vec{B}\cdot\vec{S}} \quad (6)$$

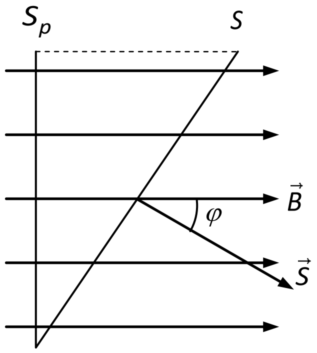
En el caso particular de que la superficie sea perpendicular al campo magnético, el ángulo φ es cero y,

$$\Phi = B\,S \quad \text{ya que} \quad \cos 0 = 1$$

En el S.I. el campo magnético se mide en *T* y el área en m^2, por lo tanto la unidad de flujo es el $T{\cdot}m^2$ que recibe el nombre de *Weber (Wb)*; es decir,

$$1Wb = 1T\cdot m^2$$

por lo que 1 *Wb es el flujo magnético que atraviesa una superficie plana de* 1 m^2 *colocada perpendicularmente en un campo magnético uniforme de* 1 *T*.



En la figura, que muestra la superficie anterior vista de perfil, se ve que la proyección de S en la dirección perpendicular al campo (S_p) es,

$$S_p = S\cos\theta$$

por lo que, combinando esta ecuación con $\Phi = E\,S\cos\theta$, también podemos expresar el flujo como,

$$\Phi = B\,S_p$$

Esta ecuación, como ya vimos en el estudio del campo eléctrico, permite dar una interpretación sencilla al flujo. En efecto, al ser el campo constante, las líneas de inducción (*ldi*) son paralelas y se distribuyen uniformemente en la superficie perpendicular al campo S_p (esto es, su número es proporcional a S_p), como ilustra la figura. En este caso la densidad de líneas de inducción (número de líneas por unidad de área colocada perpendicularmente al campo, d_{ldi}), que es constante, es,

$$d_{ldi} = Nldi / S_p$$

donde *Nldi* es el número de líneas de inducción que atraviesan S_p.

Si convenimos en dibujar un número de líneas de inducción tal que el valor numérico de d_{ldi} coincida con la magnitud de *B* (esto es, $d_{ldi} = B$), tenemos que,

$$\Phi = B\,S_p = d_{ldi}\times S_p = \frac{Nldi}{S_p}\times S_p = Nldi$$

Por lo tanto, el flujo a través de S se puede interpretar como el nº de líneas de inducción que atraviesan S_p. Ahora bien, la figura muestra que el nº de líneas que atraviesan S y S_p es el mismo, lo que significa que el flujo a través de S también se puede interpretar como el número de líneas de inducción que atraviesan S.

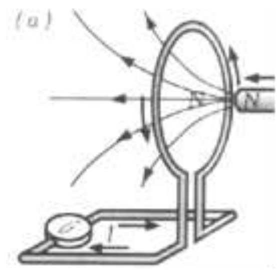
Así pues, concluimos que *el flujo de un campo magnético constante a través de una superficie plana cualquiera se puede interpretar como el número de líneas de inducción que atraviesan dicha superficie*.

Esta interpretación es de validez general, es decir, se puede aplicar al caso de campos no uniformes y superficies no planas.

La ecuación (6) permite obtener el flujo de un campo magnético constante a través de una superficie plana. Si el campo no es constante y/o la superficie no es plana, tenemos que proceder igual que hicimos con el flujo del campo eléctrico, pues se trata de la misma magnitud aplicada al campo magnético; o sea, hay que usar el cálculo integral. El resultado obtenido es el mismo,

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

3.3.2. Leyes de Faraday y Lenz



La figura muestra un circuito cerrado en forma de espira en el interior de un campo magnético creado por un imán. Faraday y Henry observaron en sus experimentos que *se genera una fem inducida en la espira siempre que varía el flujo magnético a través de ella*. También obtuvieron que la *fem* inducida depende de la velocidad con la que varía el flujo. Estos resultados llevaron a Faraday y Henry a formular la siguiente ley, conocida como ley de Faraday, que se puede expresar así,

La fem (ε) inducida en un circuito cerrado colocado en un campo magnético es igual a la velocidad con la que varía el flujo magnético a través del circuito.

Recuerda que la velocidad del cambio de una magnitud se define *como la variación de dicha magnitud por unidad de tiempo*.

En el caso particular de que la variación del flujo ($\Delta\Phi = \Phi' - \Phi$) sea proporcional al intervalo de tiempo transcurrido ($\Delta t = t' - t$), el cociente,

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{\Phi' - \Phi}{t' - t} = cte$$

expresa lo que varía el flujo en cada unidad de tiempo; es decir, la velocidad de su variación (que siempre es la misma, pues el cociente es constante); por lo tanto,

$$\varepsilon = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad \text{si } \Delta\Phi \text{ y } \Delta t \text{ son proporcionales}$$

En el caso más general en el que la variación del flujo no sea proporcional al tiempo, el cociente anterior da lo que varía el flujo por término medio cada unidad de tiempo. En este caso la *fem* inducida cambia de un instante a otro; para obtener su valor en un instante particular t tenemos que hallar el cociente anterior a partir de dicho instante y en un intervalo de tiempo infinitesimal. En el lenguaje matemático equivale a hallar la derivada del flujo respecto al tiempo[8]; es decir,

$$\boxed{\varepsilon = \frac{d\Phi}{dt}} \quad \text{si } \Delta\varphi \text{ y } \Delta t \text{ no son proporcionales}$$

De acuerdo con la interpretación física de la derivada, la ecuación expresa *lo que variaría el flujo en una unidad de tiempo a partir del instante t si dicha variación fuera proporcional al tiempo*.

Si en lugar de un circuito con una sola espira, tenemos una bobina de *N* espiras, aparece una *fem* en cada vuelta y la *fem* total es la suma de los valores individuales. Si cada espira de la bobina experimenta el mismo cambio de flujo, entonces la *fem* inducida total es, en el caso general,

$$\varepsilon = N\frac{d\Phi}{dt}$$

La ley de Faraday no indica el sentido de la *fem* inducida en el circuito. Fue Lenz en 1834 quien propuso la regla para determinar el sentido de la corriente inducida, que se conoce como ley de Lenz y se puede enunciar como,

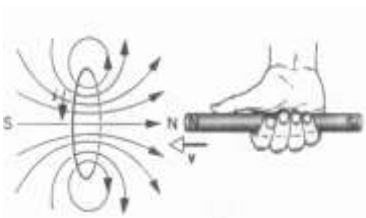
En un circuito cerrado, la corriente inducida tiene un sentido tal que crea un campo magnético que se opone al cambio que la produce.

La combinación de las dos leyes nos lleva a la ecuación,

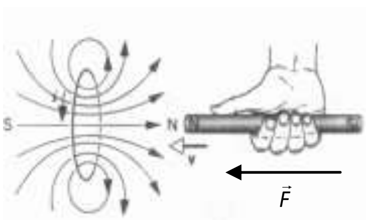
$$\boxed{\varepsilon = -N\frac{d\Phi}{dt}}$$

que es la expresión matemática de la ley de Faraday y Lenz. El signo menos de la ley de Faraday indica la oposición de la corriente inducida a la variación del flujo magnético que la crea.

La ley de Lenz es una consecuencia de conservación de la energía. En efecto, la figura muestra el polo norte de una barra imantada y una espira conductora; al mover el imán hacia la espira (o la espira hacia el imán) se genera una corriente inducida en ella. ¿Cuál es su sentido?



La corriente de la espira crea un campo magnético cuyas líneas de inducción son las mostradas en la figura. El polo norte del imán que forma la espira es aquel por el que salen las líneas de inducción. Si, como predice la ley de Lenz, la espira de la figura va a oponerse al movimiento del imán hacia ella, la cara de la espira orientada hacia el imán ha de ser el polo norte. De ese modo los dos polos norte (el de la espira y el del imán) están enfrentados y se repelen entre sí (polos del mismo nombre se repelen). La regla de la mano derecha aplicada a la espira prueba que para que las líneas de inducción salgan por la cara derecha, la corriente inducida ha de ser como se ve en la figura.



Entonces, para mantener el movimiento de la espira, un agente externo tiene que ejercer una fuerza igual y opuesta a la de repulsión magnética, (ver figura). Esta fuerza aplicada $\vec{F}$ realiza un trabajo, de modo que si la velocidad del imán es $\vec{v}$ el

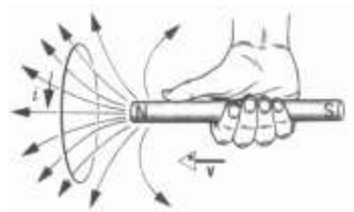
[8]Recuerda que se trata del mismo razonamiento que el utilizado en el cálculo de la velocidad de una partícula. Esto es así porque la velocidad de una partícula no es más que la variación de su posición por unidad de tiempo.

trabajo realizado por unidad de tiempo (es decir, la potencia de la fuerza) es,

$$P = \vec{F} \cdot \vec{v} = F v \cos 0 = F v$$

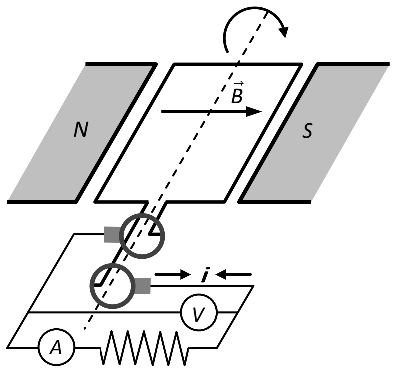
pues el ángulo formado por $\vec{F}$ y $\vec{v}$ es cero, como se ve en la figura. Este trabajo se realiza a costa de la energía del agente externo, que es transferida al imán y de éste, por el fenómeno de inducción, a la espira en forma de energía eléctrica. La energía eléctrica que se obtiene por unidad de tiempo es Fv y coincide con la que cede el agente externo al mover el imán.

Si el imán se alejara de la espira, la corriente inducida circularía en sentido contrario. De ese modo la cara derecha de la misma sería el polo sur del campo magnético creado por la corriente y, por lo tanto, la espira ejercería una fuerza de atracción sobre el imán. Para mantener ahora el movimiento de la espira se tendría que ejercer una fuerza igual y opuesta a la de atracción magnética.



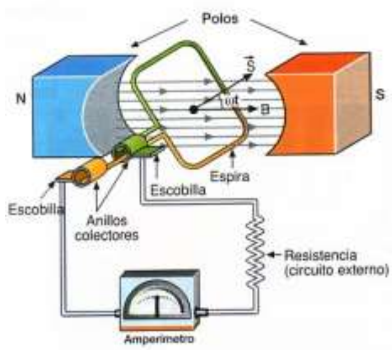
También podemos aplicar la ley de Lenz de una manera diferente. La figura muestra las líneas del campo magnético de una barra imantada que se mueve acercándose a una espira conductora. Desde este punto de vista el "cambio" es el aumento del flujo a través del anillo provocada al acercar el imán. La corriente inducida se opone a este cambio creando un campo en sentido opuesto (ver figura) que tiende a oponerse al aumento de flujo causado por el imán en movimiento. Si el imán se aleja de la espira se reduce el flujo a través de la misma y, en consecuencia, la corriente inducida tiene sentido opuesto, para crear un campo magnético de la misma orientación que la del imán que lo refuerce, oponiéndose de ese modo a su disminución.

3.4. Generación de corrientes alternas



Una de las principales aplicaciones de la inducción electromagnética es la obtención a escala industrial de energía eléctrica. La inducción electromagnética **permite transformar energía mecánica en energía eléctrica**.

Los generadores industriales de corriente emplean bobinas con muchas espiras que giran dentro de un campo magnético. Conforme giran, el flujo a través de dichas bobinas cambia, originándose en ellas una ***corriente eléctrica alterna***; es decir, una corriente en la que las cargas se mueven alternativamente en uno y otro sentido. Estos generadores se denominan ***alternadores***; un ejemplo típico es el alternador de un automóvil.



Las figuras muestran el esquema básico de un alternador. En ellas se observa una espira conductora girando con velocidad angular constante ω dentro de un campo magnético aproximadamente uniforme. El circuito se cierra con una resistencia R y tiene intercalados un amperímetro y un voltímetro que miden, respectivamente, la intensidad y la diferencia de potencial en los extremos de R. La conexión eléctrica entre los extremos de la espira y el circuito externo se asegura a través de unas piezas de grafito[9] que deslizan sobre unos pequeños aros metálicos unidos rígidamente a cada uno de los extremos de la espira. Al girar la espira, el flujo

[9]El grafito es una variedad del carbono que conduce la corriente eléctrica; la mina de un lápiz está formada por este material. La razón de usarlo aquí es porque desliza con poco rozamiento.

magnético que atraviesa su superficie varía en el tiempo y, por tanto, según la ley de Fadaray, la *fem* inducida en ella es,

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}$$

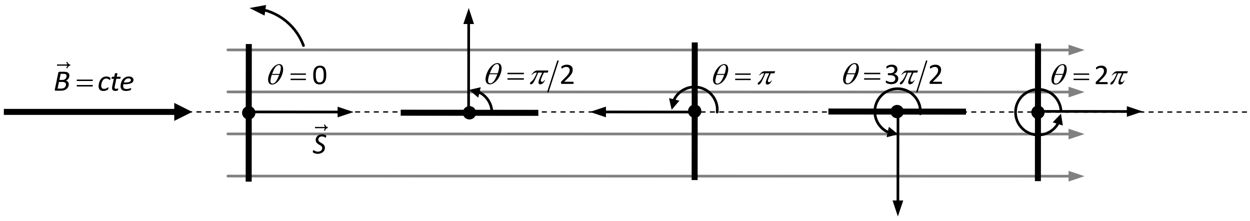
La velocidad angular (ω) de giro de espira se denomina ***pulsación***, y es constante. El tiempo que se tarda en completar una vuelta es el periodo (T) y el número de vueltas por unidad de tiempo es la frecuencia (f). Como se trata de un movimiento circular uniforme, se cumple que,

$$f = 1/T \;\text{ y }\; \omega = 2\pi/T = 2\pi f$$

La unidad de frecuencia en el S.I. es el Hercio (*Hz*) y, como se verá más adelante, expresa el número de veces que la corriente cambia de sentido en cada unidad de tiempo. Además, si la espira barre un ángulo θ en un tiempo t tenemos, al ser la velocidad angular constante, que,

$$\theta = \omega t$$

Supongamos que en el instante $t = 0$ la espira está orientada perpendicularmente al campo magnético, lo que significa que el vector $\vec{S}$ tiene la orientación del campo. La figura esquematiza la situación de la espira en intervalos de tiempo iguales a $T/4$ durante una vuelta completa.



Como el campo magnético es constante, el flujo a través de la espira es,

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = BS\cos\theta$$

donde θ es el ángulo formado por $\vec{B}$ y $\vec{S}$ en cada instante y S es el área de la superficie de la espira. Combinando las dos últimas ecuaciones tenemos que,

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = BS\cos\omega t$$

en el caso de que en el instante $t = 0$ el ángulo formado por los vectores $\vec{B}$ y $\vec{S}$ fuese uno cualquiera (φ) tendríamos que $\theta = \omega t + \varphi$ y el flujo sería,

$$\Phi = BS\cos(\omega t + \varphi)$$

denominándose ***fase*** inicial a dicho ángulo. De acuerdo con la ley de Faraday, la *fem* inducida viene dada por,

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}\left[BS\cos(\omega t + \varphi)\right]$$

que teniendo en cuenta que B, S y ω son constantes y que la derivada del coseno es el seno con signo negativo, queda,

$$\varepsilon = BS\omega\,\text{sen}(\omega t + \varphi)$$

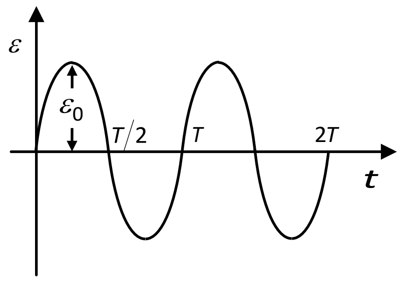
que expresa la *fem* inducida en la espira en función del tiempo. Por lo tanto, la *fem* obtenida es variable en el tiempo y senoidal. El valor máximo se obtiene cuando $\sin(\omega t + \varphi) = 1$; designando por ε_0 al valor máximo tenemos,

$$\boxed{\varepsilon = \varepsilon_0\,\text{sen}(\omega t + \varphi)} \;\text{ donde }\; \varepsilon_0 = BS\omega$$

Si en lugar de una sola espira se tienen *N*, entonces el flujo magnético es *N* veces mayor y el valor máximo de la *fem* es,

$$\boxed{\varepsilon_0 = NBS\omega}$$

En la figura se ha representado la *fem* en función del tiempo a lo largo de dos periodos, en el caso particular de $\varphi = 0$. La gráfica prueba que la *fem* es periódica, pues sus valores se repiten a partir de *T*. Como se ve, la corriente cambia de sentido a lo largo de un periodo; esto es, si la frecuencia de la corriente es de *f* Hz, entonces cambia de sentido *f* veces en 1 *s*.

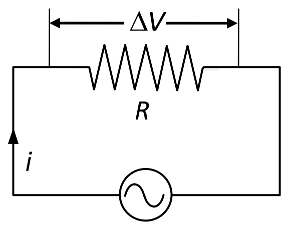


La corriente que suministran las compañías eléctricas es alterna senoidal y tiene una frecuencia de 50 Hz.

Para que un generador produzca una corriente inducida necesita una fuente de energía externa (hidráulica, térmica, nuclear ...) que haga que la bobina gire con la frecuencia deseada. Esta energía externa es transformada en eléctrica por el generador y, posteriormente, en nuestras casas y en las industrias, es de nuevo transformada en la clase de energía que necesitamos.

3.5. Fuerza electromotriz e intensidad eficaces

Sea un circuito de corriente alterna formado por una resistencia *R* y un generador de *fem* $\varepsilon = \varepsilon_0 \sin\omega t$ y resistencia interna *r* despreciable, como ilustra la figura. Al aplicar la ley de Ohm generalizada,



$$\left.\begin{array}{l} i = \varepsilon / R + r \\ r = 0 \end{array}\right\} \Rightarrow \; i = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{\varepsilon_0}{R}\sin\omega t$$

que da la intensidad del circuito y que, como vemos, es variable y senoidal. Su valor máximo (I_0) se obtiene cuando $\sin\omega t = 1$ por lo que,

$$I_0 = \varepsilon_0 / R$$

Entonces podemos expresar la intensidad como,

$$i = I_0 \,\mathrm{sen}\,\omega t$$

Así pues, para un circuito de corriente alterna que solo tiene *resistencia óhmica*, la potencia instantánea (P_i) es,

$$P_i = \varepsilon\, i = \varepsilon_0 \sin\omega t\, I_0 \sin\omega t = \varepsilon_0 I_0 \sin^2 \omega t$$

Para obtener la potencia media, que es la que reamente importa, hay que tener en cuenta que el valor medio de $\sin^2 \omega t$ para cualquier número completo de ciclos es igual a ½. Puesto que en la ecuación ε_o e I_0 son constantes, el valor medio que toma la ecuación a lo largo de un ciclo (es decir, la potencia media, *P*) es,

$$P = ½\varepsilon_0 I_0$$

que podemos expresar como,

$$P = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{2}}\frac{I_0}{\sqrt{2}} \quad \text{pues} \quad \frac{1}{2} = \frac{1}{\sqrt{2}}\frac{1}{\sqrt{2}}$$

Si definimos la ***intensidad eficaz (I_e)*** y la ***fuerza electromotriz eficaz (ε_ε)*** como,

$$I_e = I_0 / \sqrt{2} \;\; \text{y} \;\; \varepsilon_e = \varepsilon_0 / \sqrt{2}$$

la potencia media disipada en la resistencia en función de los valores eficaces es,

$$\boxed{P=\varepsilon_e I_e}$$

que si la comparamos con la ecuación que da la potencia en un circuito de corriente continua ($P=\varepsilon i$) podemos decir que, *la fem y la intensidad eficaces de una corriente alterna son las que debería tener una corriente continua que disipara la misma energía en la misma resistencia*.

Si dividimos los dos términos de la ecuación $I_0=\varepsilon_0/R$ por $\sqrt{2}$ tenemos,

$$I_e=\varepsilon_e/R \Rightarrow \varepsilon_e=I_eR$$

por lo que podemos expresar la potencia como,

$$P=I_e^2R$$

y la energía promedio absorbida por la resistencia en un intervalo de tiempo Δt como,

$$E=I_e^2R\Delta t$$

que se disipa en forma de calor.

Las ecuaciones de la potencia en corriente alterna solo son válidas cuando el circuito está formado exclusivamente por resistencias. En circuitos con motores, inducciones y/o condensadores estas ecuaciones no son satisfactorias. Para que lo sean hay que incluir un término denominado factor de potencia, que es diferente en cada circuito.

3.6. Ondas electromagnéticas

3.6.1. Concepto y propiedades

A mediados del siglo XIX, las experiencias de Oersted, Ampère y Faraday habían conducido a establecer una íntima relación entre la Electricidad y el Magnetismo. Sin embargo, esta evidencia experimental no se vio confirmada teóricamente hasta la década de 1860, gracias a los trabajos del Físico escocés James Clerk Maxwell (1831–1879).

Maxwell se dio cuenta de inmediato de que las fuerzas eléctricas y magnéticas, caracterizadas por sus constantes respectivas en el vacío:

$$K=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}=9\cdot10^9\ \frac{N\cdot m^2}{C^2}\ \ y\ \ K'=\frac{\mu_0}{4\pi}=10^{-7}\ \frac{N}{A^2}$$

se encontraban relacionadas entre sí en la forma,

$$\frac{K}{K'}=\frac{1/4\pi\varepsilon_0}{\mu_0/4\pi}=\frac{1}{\varepsilon_0\mu_0}=\frac{9\cdot10^{16}\ N\cdot m^2/C^2}{10^{-7}\ N/A^2}=9\cdot10^{16}\ \frac{m^2}{s^2}$$

de donde resulta que $$c=\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}=3\cdot10^8\ m/s$$

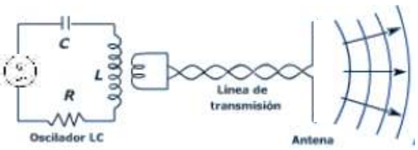
Como éste era precisamente el valor de la velocidad de la luz en el vacío, Maxwell llegó a la conclusión de que los campos eléctrico y magnético debían relacionarse de alguna manera con la velocidad de propagación de la luz. Desde este punto de partida y haciendo gala de su enorme intuición matemática, Maxwell logró la unificación de la Electricidad, el Magnetismo y la Óptica, resumiendo las leyes hasta entonces conocidas en cuatro ecuaciones, que se designan en la actualidad con el nombre de ecuaciones de Maxwell, y que relacionan los campos eléctrico y magnético con las causas que los originan, que son las cargas eléctricas. Estas leyes desempeñan en el Electromagnetismo un papel análogo al de las leyes de Newton en la Dinámica clásica.

Las soluciones de las ecuaciones de Maxwell para los campos eléctrico y magnético conducen a expresiones que tienen la estructura formal de ecuaciones de onda. Esto significa que una corriente eléctrica variable (es decir, un movimiento acelerado de cargas eléctricas) crea un campo electromagnético variable que se propaga por el espacio libre exactamente igual que lo hace una onda. Estas perturbaciones, llamadas ***ondas electromagnéticas***, se propagan a la velocidad de la luz. La coincidencia entre la velocidad de propagación de la luz y de las ondas electromagnéticas no es casual, sino que revela que la luz es una onda electromagnética capaz de propagarse en el vacío, sin necesidad de medio material alguno. Para una onda electromagnética plana que se propaga a lo largo del eje *OX*, las ecuaciones de los campos eléctrico *E* y magnético *B* son,

$$E = E_0 \sin(\omega t - kx) \;\text{ y }\; B = B_0 \sin(\omega t - kx)$$

donde E_0 y B_0 representan, respectivamente, los valores máximos de *E* y *B*.

Si las ondas electromagnéticas se propagan en el vacío y en el vacío no hay partículas, ¿qué es lo que oscila en las ondas electromagnéticas? Son los campos magnético y eléctrico asociados a la onda los que lo hacen.

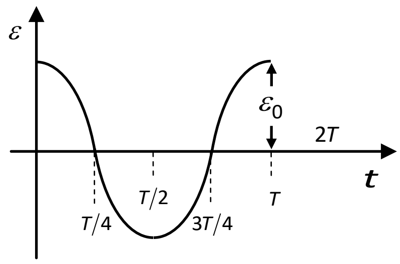


Circuito básico RLC generador de ondas electromagnéticas.

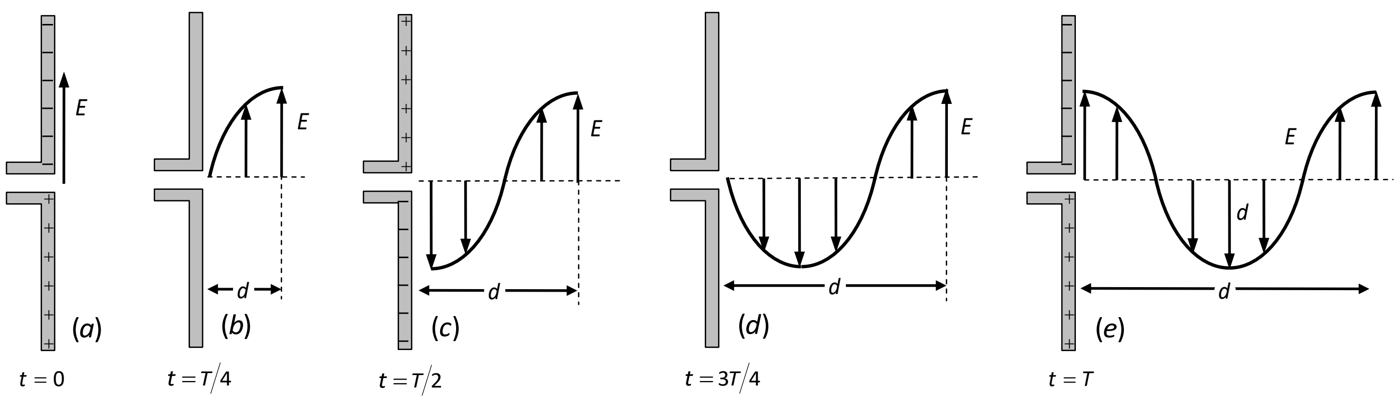
La figura superior es un dibujo esquemático de una antena dipolar eléctrica, que consta de dos varillas conductoras dobladas que se alimentan mediante una fuente de corriente alterna de alta frecuencia, cuyo periodo es *T*.

Si empezamos a contar el tiempo y ponemos el reloj a cero cuando la *fem* es máxima (ver figura intermedia), se cumple que,

$$\varepsilon(t=0)=\varepsilon_0;\;\; \varepsilon(t=T/4)=0;\;\; \varepsilon(t=T/2)=-\varepsilon_0;\;\; \varepsilon(t=3T/4)=0 \;\text{ y }\; \varepsilon(t=T)=\varepsilon_0$$



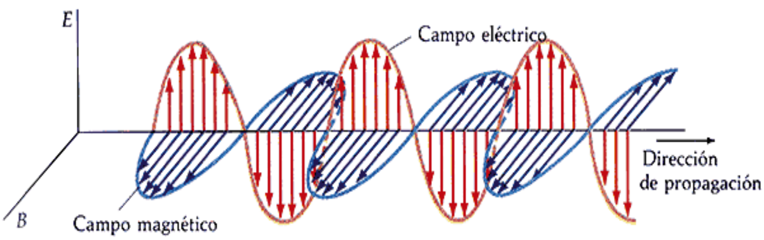
Por lo tanto, en el instante $t=0$ (indicado en la figura *a* inferior) los extremos de las varillas se encuentran cargados al máximo y, por lo tanto, existe un campo eléctrico máximo cerca de las varillas y paralelo a ellas, que se aleja a la velocidad de la luz. Al cabo de un tiempo $t = T/4$, el campo es máximo a una distancia de las varillas $d = c \cdot T/4$, donde *c* es la velocidad de la luz, mientras que, en ese tiempo, las varillas se han descargado y el campo en sus proximidades es cero, como se ve



en la figura (*b*). Para $t = T/2$, el campo es máximo a una distancia $d = c \cdot T/2$ y las varillas están de nuevo cargadas, pero con cargas opuestas; lo que significa que el campo a lado de las varillas es máximo de nuevo, pero de sentido opuesto, como indica la figura (*c*). Para $t = 3T/4$, el campo es máximo a una distancia $d = c \cdot 3T/4$ y las varillas están descargadas nuevamente, por lo que significa que el campo es nulo cerca de ellas, como muestra la figura (*d*). Finalmente, en el instante $t = T$, el campo es máximo a una distancia $d = c \cdot T$ y las varillas adquieren la misma carga que en el instante $t = 0$, por lo que el campo al lado de las varillas es el mismo que el que había en $t = 0$, como se aprecia en la figura (*d*). Observa que el campo eléctrico creado por la antena dipolar varía como un oscilador armónico (es decir, es oscilante) y que esta perturbación se propaga en el espacio a la velocidad de la luz, lo que da lugar a una onda electromagnética armónica.

También existe un campo magnético oscilante (no dibujado en las figuras) que rodea a las varillas creado por la corriente eléctrica (oscilante) que circula por ellas. Igual que el campo eléctrico, las fluctuaciones del campo magnético se alejan de la varilla a la velocidad de la luz.

Lo que tenemos en definitiva son dos *campos oscilantes* (uno eléctrico y otro magnético) que generan una *onda electromagnética* que se propaga en el espacio. Las ondas electromagnéticas se producen pues cuando se aceleran cargas eléctricas[10]; en nuestro caso la aceleración de las cargas es tal que les provoca un movimiento de oscilación a lo largo de la antena dipolar. Los campos eléctrico y magnético a grandes distancias de la antena emisora oscilan en fase, de modo que la onda avanza en una dirección perpendicular al plano de oscilación de ambos campos, como se aprecia en la figura.



Años más tarde a la síntesis de Maxwell, el físico alemán Heinrich Hertz comprobó la existencia de un amplio espectro de ondas electromagnéticas de propiedades análogas a las de la luz, lo que sirvió de respaldo a la teoría de Maxwell. La Óptica, desde esa fecha, dejó de ser una rama independiente de la Física para integrarse en el Electromagnetismo. Esta unificación, llamada ***Síntesis electromagnética de Maxwell***, con ligeras variaciones introducidas por las teorías cuántica y relativista, aún perdura en la actualidad, constituyendo uno de los mayores logros del pensamiento científico.

3.6.2. Energía

Las ondas electromagnéticas, como cualquier otro tipo de onda, transporta energía. Puede demostrarse que la energía que transporta una onda electromagnética por unidad de área perpendicular a la dirección de propagación y por unidad de tiempo; es decir, la intensidad *I* de la onda en un punto viene expresada por,

$$I = \frac{1}{2}\frac{E_0 B_0}{\mu_0}$$

[10] También se generan cuando los electrones ligados a los átomos o moléculas verifican transiciones a estados de menor energía.

donde E_0 y B_0 son, respectivamente, los valores máximos de los campos eléctrico y magnético asociados a la onda y μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío[11].

En una onda electromagnética en el vacío se cumple que $E = cB$ y teniendo en cuenta que $c^2 = 1/\varepsilon_0\mu_0$, la ecuación anterior se puede expresar también como,

$$I = \frac{1}{2}c\varepsilon_0 E_0^2 = \frac{1}{2}c\frac{B_0^2}{\mu_0}$$

Como veremos en el tema de Física moderna, las ondas electromagnéticas en general (y la luz en particular) tienen un comportamiento dual. Se propagan como una onda y presentan las propiedades características de las ondas, como la difracción. Sin embargo, cuando interaccionan con la materia se comportan como un chorro de partículas sin masa que reciben el nombre de ***fotones***.

Los experimentos prueban que la interacción de las ondas electromagnéticas con la materia solo se puede explicar si la energía de los fotones es directamente proporcional a la frecuencia de la radiación; es decir,

$$E = hf$$

donde *h* es la constante de proporcionalidad, que recibe el nombre de constante de Plank y que es una de las más importantes de la Física.

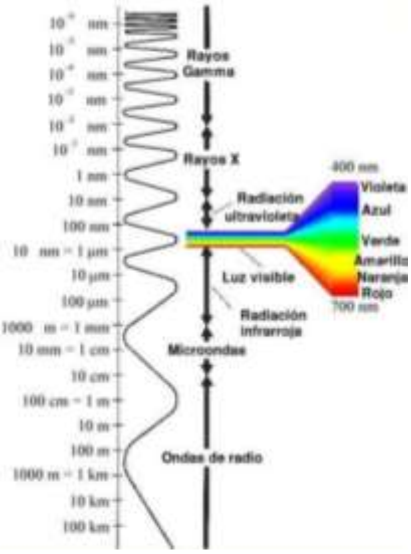
3.6.3. Espectro electromagnético. Aplicaciones

Todas las ondas electromagnéticas tienen la misma naturaleza: son transversales formadas por un campo eléctrico y otro magnético oscilantes que vibran en planos perpendiculares entre sí. Solo se diferencian en su frecuencia y en su longitud de onda.

El ***espectro electromagnético*** *es el conjunto de todas las ondas de distintas frecuencias en que puede descomponerse la radiación electromagnética.*

Como en cualquier onda, en las ondas electromagnéticas se cumple que,

$$c = \lambda f = \lambda/T$$

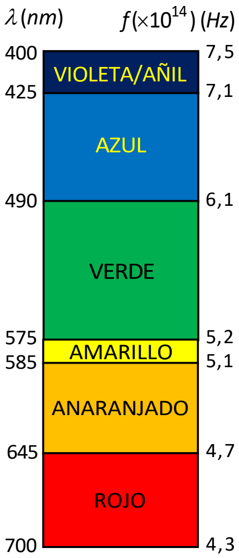


donde λ es la longitud de onda, *f* la frecuencia, *T* el periodo y *c* la velocidad de propagación de las ondas (la velocidad de la luz), que en vació es aproximadamente igual a $3\cdot 10^8\ m/s$. La figura muestra el espectro electromagnético en función de la frecuencia de las ondas. Las ondas electromagnéticas se clasifican en función de su frecuencia en:

- **Ondas de radio**. Son generadas por un circuito eléctrico oscilante. Sus longitudes de onda están comprendidas entre unos pocos centímetros y varios kilómetros, por lo que sus frecuencias oscilan entre 10^4 y 10^{10} *Hz*. Se emplean en radio y televisión.
- **Microondas**. Son producidas por las vibraciones de los enlaces que forman las moléculas. Sus frecuencias están comprendidas entre 10^{10} y 10^{12} *Hz*. Se utilizan en los hornos de las cocinas, y en radioastronomía y en radares por su facilidad para atravesar la atmósfera.

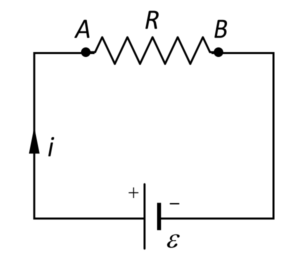
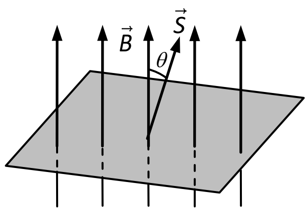
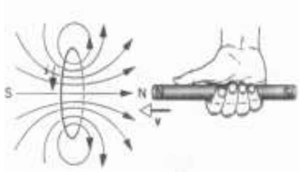
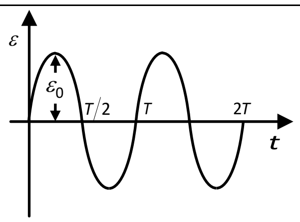
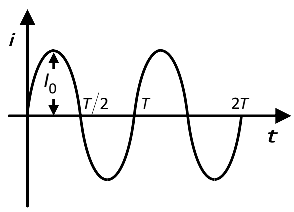
[11]Porque estamos suponiendo que las ondas se propagan en el vacío o en el aire.

- **Radiación infrarroja**. Son ondas generadas por los cuerpos calientes y se deben a las vibraciones de los átomos en torno a sus posiciones de equilibrio. Sus frecuencias están comprendidas entre 10^{12} y $4 \cdot 10^{14}$ *Hz* aproximadamente. Tienen aplicaciones en la industria y en medicina (termografías médicas, rehabilitación muscular y ósea). También se utilizan en los mandos a distancia de aparatos electrónicos, garajes y automóviles; en la deshidratación de frutas y verduras; en alarmas, etc. La mitad de la energía solar es radiación infraroja.
- **Luz visible**. Son las ondas electromagnéticas percibidas por nuestra retina. Sus longitudes de onda están comprendidas entre los 400 y los 740 *nm*, por los que sus frecuencias están entre los $7{,}7 \cdot 10^{14}$ y los $4 \cdot 10^{14}$ *Hz* aproximadamente. Representa la zona más pequeña del espectro electromagnético y se generan por los saltos electrónicos entre niveles atómicos y moleculares excitados.
  Las longitudes de onda correspondientes a los colores básicos interpretados por nuestro cerebro son: rojo (620 a 740 *nm*), naranja (590 a 620 *nm*), amarillo (570 a 590 *nm*), verde (490 a 570 *nm*), azul (450 a 490 v), añil (430 a 490) y violeta (400 a 430 *nm*).



$1\ nm = 10^{-9}\ m$

- **Radiación ultravioleta**. Se denomina así por tener frecuencias superiores a la luz violeta, que es la luz visible de mayor frecuencia. Sus longitudes de onda están comprendidas entre los 3 y los 400 *nm* y sus frecuencias entre los 10^{17} y los $7{,}7 \cdot 10^{14}$ *Hz*.
  Se producen de forma análoga a la luz visible. El Sol es un poderoso emisor de rayos ultravioleta, que son los responsables del bronceado de la piel. Estos rayos, que en parte son absorbidos por la capa de ozono de la atmósfera, pueden resultar peligrosos para la salud en dosis excesivas.
  La radiación ultravioleta procedente del Sol se suele clasificar en tres grupos en función de su frecuencia: 1) los ***UV-A***, de menor frecuencia, sin peligro para la salud; por el contrario favorecen la producción de vitamina D y contribuyen a la fijación del calcio en los huesos. 2) los ***UV-B***, de frecuencia mayor, son peligrosos para los seres vivos en dosis excesivas: pueden producir cáncer de piel, alteraciones en la visión y debilitamiento del sistema inmunológico. 3) los ***UV-C*** de mayor frecuencia, son los más peligrosos, pero son absorbidos casi en su totalidad por la capa de ozono y apenas llegan a la superficie de la Tierra.
- **Rayos X**. Sus longitudes de onda son del orden del tamaño de los átomos, por lo que sus frecuencias están comprendidas entre los 10^{17} y los 10^{19} *Hz*. Son generados cuando se obliga a un haz de electrones a chocar con un blanco fijo; los electrones se frenan muy rápidamente, de modo que parte de esa energía se transforma en rayos X.
  Se utilizan en la industria y en medicina (radiografías). La exposición prolongada a este tipo de radiación es muy peligrosa para la salud, por lo que se debe hacer un uso muy controlado de la obtención de radiografías.
- **Rayos gamma**. Es la radiación de frecuencia más elevada que se conoce, lo que significa que es especialmente peligrosa para la salud de los seres vivos. Se generan en procesos radiactivos de los átomos y en reacciones nucleares. Su longitud de onda es del orden del tamaño de los núcleos atómicos. Tienen un gran poder de penetración (solo se frenan con planchas de plomo y gruesos muros de hormigón). Se usan en radioterapia, para destruir células cancerosas.

	FÓRMULAS SELECTIVIDAD	**UTILIZACIÓN**
	**Ley de Ohm y potencia en corriente continua:** Normal: $i=(V_A-V_B)/R=\Delta V/R$ (1) Generalizada: $i=\dfrac{\varepsilon}{R+r}$ (2) Nota que: $r=0 \Rightarrow \varepsilon=\Delta V \Rightarrow i=\varepsilon/R$ (3) Potencia (P) $\begin{cases}\text{General: } P=\Delta V\, i \quad (4)\\ \text{Solo resistencia: } P=i^2R \quad (5)\end{cases}$	• Circuito básico de corriente continua: resistencia (R), diferencia de potencial ($V_A-V_B=\Delta V$), intensidad (i), y generador con *fem* (ε) y resistencia interna (r). • Ec. 1ª, 2ª y 3ª: relacionan: i, ΔV, ε, R y r. Solo válidas en circuito con resistencia. • Ec. 4ª: relaciona P con i y ΔV (de validez general) • Ec. 5ª: relaciona P con i y R. Solo válida en circuito con resistencia.
	**Flujo (Φ) de un campo magnético constante (B) a través de una superficie (S) plana que forman un ángulo (θ):** $\Phi=\vec{B}\cdot\vec{S}=BS\cos\theta$ **Unidad flujo en el S.I. (Weber):** $1Wb=1T\times 1m^2$	• Ecuación para hallar el flujo de un campo magnético constante $(\vec{B})$ a través de una superficie plana (S) cuyo vector asociado es $\vec{S}$ y que forman un ángulo (θ). • El flujo se puede interpretar como el número de líneas de inducción que atraviesan la superficie. • Recuerda que el flujo es importante porque su variación en un circuito cerrado genera una *fem* inducida.
	**Leyes de Faraday y Lenz de la *fem* inducida (ε):** $\varepsilon=-\dfrac{d\Phi}{dt}$ (una espira); $\varepsilon=-N\dfrac{d\Phi}{dt}$ (N espiras) **Si ε y t son directamente proporcionales:** $\varepsilon=-\dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ (una espira); $\varepsilon=-N\dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ (N espiras)	• Ecuación para calcular la *fem* inducida (ε) en un circuito cerrado atravesado por un flujo variable Φ. • Observa que si el flujo (Φ) y el tiempo (t) son directamente proporcionales, la derivada se transforma en un cociente entre $\Delta\Phi=\Phi'-\Phi$ y $\Delta t=t'-t$.
	**Fuerza electromotriz (*fem*, ε) alterna senoidal:** $\varepsilon=\varepsilon_0\,\text{sen}(\omega t+\varphi) \;\Rightarrow\; \varepsilon_{max}=\varepsilon_0=NBS\omega$ **Periodo (T) y frecuencia (f):** $T=1/f=2\pi/\omega$	• Para obtener la *fem* instantánea generada por un alternador de corriente alterna senoidal. • N: número espiras generador • S: área de la superficie de cada espira. • ω: frecuencia angular (velocidad angular espiras). • φ: fase inicial (ángulo formado por $\vec{B}$ y $\vec{S}$ en el instante inicial.
	**Intensidad alterna senoidad (solo con R):** $\left.\begin{matrix} i=\varepsilon/(R+r)\\ r=0\end{matrix}\right\} \Rightarrow i=\dfrac{\varepsilon}{R}=\dfrac{\varepsilon_0}{R}\sin(\omega t+\varphi)$ **Ley Ohm corriente alterna (solo con R) en función de los valores máximos:** Si $\sin(\omega t+\varphi)=1 \;\Rightarrow\; I_{max}=I_0=\dfrac{\varepsilon_0}{R}$ (Ley Ohm)	• Ec. 1ª: para calcular la intensidad instantánea (i) en en un circuito de alterna solo con R si se conoce (ε_0). • Ec. 2ª: Ley de Ohm corriente alterna en función de los valores máximos (I_0) y(ε_0). Podemos hallar uno de ellos sin conocemos R.
	Fuerza electromotriz (ε_e) e intensidad eficaz (I_e): $I_e=I_0/\sqrt{2}$ y $\varepsilon_e=\varepsilon_0/\sqrt{2}$ (1) **Ley Ohm corriente alterna (solo con R) en función de los valores eficaces:** $I_e=\dfrac{\varepsilon_e}{R}$ (2)	• Ec 1ª: Para hallar los valores eficaces de la intensidad (I_e) y la *fem* (ε_e) en función de los máximos (I_0, ε_0). • ε_e e I_e son los valores que tendrían que tener ΔV e i en un circuito de corriente continua que disipara igual energía en la misma resistencia. • Ec 2ª: Ley de Ohm corriente alterna en función de los valores máximos (I_e) y(ε_e).
	Potencia y energía medias en corriente alterna (circuito solo con R): $P=\dfrac{1}{2}\varepsilon_0 I_0=\varepsilon_e I_e$ (1) y $E=I_e^2R\Delta t$ (2)	• Ec. 1ª: calcula la potencia media disipada en un circuito de corriente alterna conectado a una R. • Ec. 2ª: calcula la energía media disipada, en un intervalo de tiempo Δt, en un circuito de corriente alterna conectado a una R.