

8. INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA.

Desarrollamos la unidad de acuerdo con el siguiente hilo conductor:

1. ¿En qué condiciones un campo magnético induce corriente eléctrica? Experiencias de Faraday y Henry. Ley de Faraday y ley de Lenz.
 2. ¿Cómo se produce la corriente eléctrica alterna? ¿Cómo se utiliza en los motores eléctricos? ¿Cómo se transporta?
 - 2.1. Generadores eléctricos.
 - 2.2. Transformadores eléctricos.
 - 2.3. Motores eléctricos.
 3. ¿En qué consiste la síntesis electromagnética de Maxwell? Unificación de electricidad, magnetismo y óptica.
 - 3.1. El espectro electromagnético.
- APÉNDICES: A.1. Aplicaciones de los campos electromagnéticos. A.2. El horno microondas.

1. ¿EN QUÉ CONDICIONES UN CAMPO MAGNÉTICO INDUCE CORRIENTE ELÉCTRICA? EXPERIENCIAS DE FARADAY Y HENRY. LEY DE FARADAY Y LEY DE LENZ.

El descubrimiento de que una corriente eléctrica originaba un campo magnético fue crucial para el desarrollo de la física y la tecnología. Surgió entonces la pregunta: ¿se podría producir electricidad a partir del magnetismo? En aquella época, principios del siglo XIX, los únicos dispositivos que existían para generar corriente eran las celdas voltaicas, que proporcionaban corrientes pequeñas gracias a la disolución en ácido de metales costosos; las celdas voltaicas son las precursoras de nuestras modernas baterías.

En 1831 el inglés Michael Faraday y el norteamericano Joseph Henry, casi simultáneamente y trabajando de forma independiente, descubrieron la llamada **inducción electromagnética**, la generación de corriente eléctrica inducida por un campo magnético variable, base del desarrollo de toda la industria eléctrica actual. Pero además fue el punto de partida del desarrollo de una concepción unitaria de la electricidad y el magnetismo que llevaría a cambiar radicalmente nuestra concepción de la naturaleza.

Faraday y Henry observaron a través de numerosas experiencias las condiciones que deben darse para que en un circuito eléctrico se induzca corriente eléctrica (figura 1):

a) y b). Cuando existe movimiento relativo entre el imán o electroimán y la espira, la aguja del galvanómetro se mueve en una dirección o en la dirección opuesta, señalando una corriente en el circuito tanto mayor cuanto mayor velocidad se imprima al movimiento. Si no hay movimiento relativo no se observa desviación en la aguja.

c) y d). Sin haber desplazamientos, también se observan corrientes inducidas si se modifica el campo magnético que atraviesa el circuito, bien por variar la intensidad de la corriente que lo genera (instantáneamente, al conectar o desconectar el circuito que genera el campo, o en intervalos más duraderos, utilizando un reóstato -resistencia- para obtener una corriente de intensidad variable) o por variar la superficie del circuito inducido expuesta al campo (al modificar su forma o al hacerlo girar).

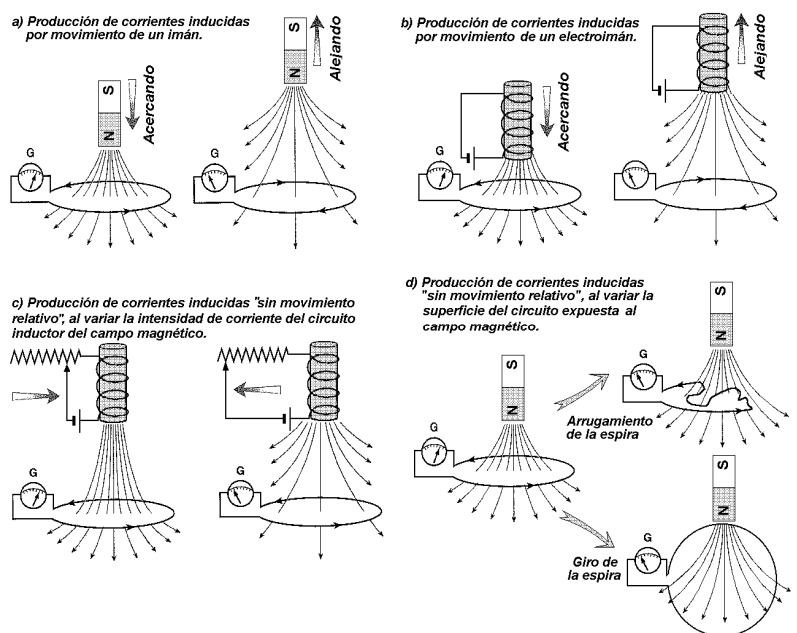
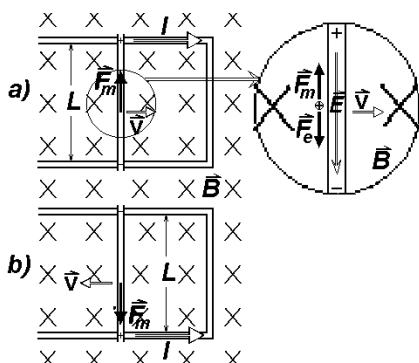


Figura 1

El hecho común a todas las experiencias anteriores es que existe una variación del número de líneas de campo magnético que atraviesan el circuito (espira, bobina,...). Para cuantificar estas líneas de campo utilizamos el concepto de flujo Φ , ya introducido al estudiar el campo eléctrico¹. Se observa que la intensidad (I_{ind}) o la

¹ Revisión del concepto de flujo, aplicado al flujo magnético:

diferencia de potencial de la corriente inducida (conocida como fuerza electromotriz, fem^2 , ϵ_{ind}) es tanto mayor cuanto más acusada es la variación del flujo magnético en el transcurso del tiempo.



Sobre las cargas libres de un conductor en movimiento dentro del campo \vec{B} actúa la fuerza magnética \vec{F}_m , arrastrándolas a lo largo del mismo y originando una separación de cargas, una diferencia de potencial entre los extremos del conductor que induce una corriente en el circuito. Dentro del conductor aparece un campo eléctrico y por tanto, una fuerza eléctrica \vec{F}_e que se opone a \vec{F}_m . En el equilibrio, los módulos de las dos fuerzas son iguales y mientras exista movimiento del conductor a través del campo magnético, se mantiene la diferencia de potencial entre sus extremos.

En la situación a) y b) se originan corrientes inducidas en sentidos opuestos, debido a F_m .

Figura 2

delimita el conductor disminuye al aumentar la distancia recorrida, resulta: $\partial\Phi = -v \cdot B \cdot L \cdot dt$ (2).

De las relaciones (1) y (2) se concluye que: $\epsilon_{ind} = -\frac{\partial\Phi}{\partial t}$, expresión conocida como ley

de Faraday o de Faraday-Henry:

El valor de la fuerza electromotriz inducida en un circuito es igual y de signo opuesto a la rapidez con que varía el flujo magnético a través de la superficie limitada por el mismo, independientemente de las causas que provoque la variación del flujo.

Si el circuito es una bobina constituida por N espiras, la fem se multiplica de modo que: $\epsilon_{ind} = -N \cdot \frac{\partial\Phi}{\partial t}$.

Cuando el flujo magnético se modifica con la rapidez de 1 Wb/s, entonces se induce una fem de 1 V por espira de conductor.

La intensidad de la corriente inducida, en base a la ley de Ohm, vendrá determinada por: $I_{ind} = \frac{\epsilon_{ind}}{R}$, siendo R la resistencia eléctrica que ofrece el circuito al paso de la corriente.

La corriente inducida origina una nueva fuerza magnética \vec{F}_{m_ind} que se opone al movimiento del conductor dentro del campo \vec{B} (figura 4). Para mantener su velocidad, y la corriente eléctrica inducida, se debe aplicar una fuerza externa en la dirección y sentido del

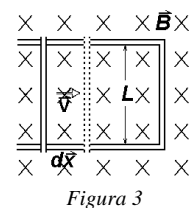


Figura 3

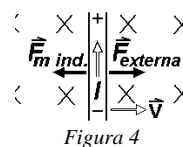
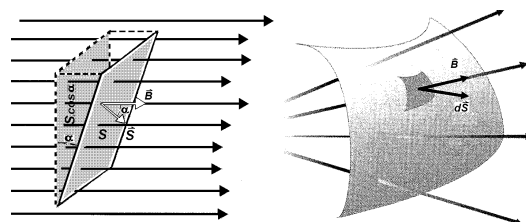


Figura 4

El flujo de un campo magnético uniforme \vec{B} a través de una superficie plana de área S (representada por el vector \vec{S} , perpendicular al plano de dicha superficie) se define como el producto escalar: $\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S \cdot \cos\alpha$; se trata de un escalar que representa gráficamente el número neto de líneas de campo que atraviesan dicha superficie. Unidad SI: *weber* ($1 \text{ Wb} = 1 \text{ T m}^2$).



En el caso general de que el campo de fuerzas no sea uniforme o la superficie no sea plana, debemos recurrir al cálculo integral para determinar el flujo: $\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$.

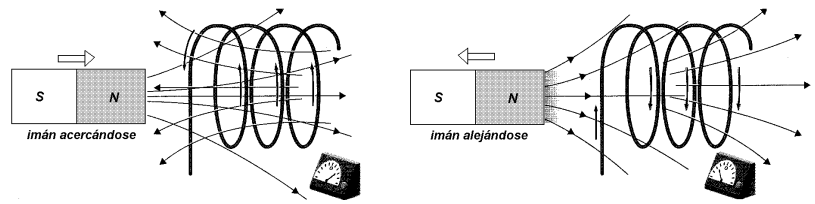
Si la superficie es cerrada: $\Phi = \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$; por convenio, el vector $d\vec{S}$ siempre está dirigido hacia el exterior de la superficie cerrada; por tanto, el flujo Φ siempre será positivo cuando las líneas de campo salgan de la superficie cerrada, y será negativo cuando entren en ella.

² La fem representa la variación o diferencia de potencial que se establece entre dos puntos de un generador eléctrico (por ejemplo, una pila o, en nuestro caso, un flujo magnético variable). Equivale a la cantidad de energía que el generador es capaz de transferir a la unidad de carga que se mueve por el circuito. Unidad SI: Julio/Culombio = Voltio (V).

vector \vec{v} . Esta fuerza externa es la que realiza el trabajo necesario para mantener la corriente eléctrica inducida, para mantener la diferencia de potencial entre los extremos del conductor (la fem inducida). *¡Está claro que la energía no surge de la nada, sino que se transfiere de un cuerpo a otro y/o se transforma de una forma a otra!*

Este hecho queda recogido en la **ley de Lenz** y aclara el signo negativo en la expresión de la ley de Faraday:

La dirección y sentido de la corriente inducida es tal que el campo magnético creado por ella se opone a la variación del flujo magnético que la produce (figura 5).



El campo magnético debido a la corriente inducida se opone al aumento o a la disminución de flujo entrante del campo del imán.

Figura 5

Es como un mecanismo de inercia de la naturaleza con el que los sistemas tienden a mantener su estado de equilibrio original. La ley de Lenz es una forma más de enunciar el principio de conservación de la energía.

De lo comentado hasta ahora, deben quedar claros dos principios básicos de la inducción electromagnética:

- 1. Toda variación del flujo de un campo magnético externo que atraviesa un circuito cerrado produce en éste una fem inducida y, por tanto, una corriente eléctrica inducida que se opone a esa variación.**
- 2. La corriente inducida es una corriente instantánea, pues sólo dura mientras dura la variación del flujo.**

De aquí se deduce que es posible detectar fenómenos de inducción utilizando un único circuito. Toda corriente de intensidad variable que circule por un conductor crea un campo magnético variable en torno al propio conductor, campo que induce una fem en el propio conductor y, por tanto, una corriente inducida que se opone a la variación que la produce. Este fenómeno se denomina **autoinducción** y se manifiesta al cerrar y abrir un circuito o en los circuitos de corriente alterna, que describimos seguidamente.

A.1. Resuelve las siguientes actividades:

A.1.1. Una corriente eléctrica que circula por un hilo crea un campo magnético. Un campo magnético, ¿crea siempre una corriente eléctrica en un hilo que lo atraviesa?

A.1.2. Haciendo uso de la ley de Ohm ($I = \frac{\varepsilon_{ind}}{R}$), de la ley de Faraday ($\varepsilon_{ind} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$) y de la definición de intensidad de corriente ($I = \frac{q}{\Delta t}$),

determina la relación entre la cantidad de carga eléctrica transportada por un circuito eléctrico y la variación del flujo del campo magnético y comenta su significado físico.

A.1.3. Una espira cuadrada de 5 cm de lado, situada en el plano XY, se desplaza con velocidad $\vec{v} = 2\vec{i}$ cm/s, penetrando en el instante $t = 0$ s en una región del espacio donde hay un campo magnético uniforme $\vec{B} = -0,2\vec{k}$ T. Calcula la fem y la intensidad de la corriente inducidas en la espira si su resistencia es de 10 Ω . Haz un esquema indicando el sentido de la intensidad de la corriente eléctrica inducida.

A.1.4. Una bobina circular, formada por 200 espiras de 10 cm de radio, se encuentra situada perpendicularmente a un campo magnético de 0,2 T. Determina la fem inducida en la bobina si al cabo de 0,1 s: a) se duplica el campo magnético; b) se anula el campo magnético; c) se invierte el sentido del campo magnético; d) se gira la bobina 90° en torno al eje paralelo al campo magnético; e) se gira la bobina 90° en torno al eje perpendicular al campo magnético.

A.1.5. Una bobina cuadrada, plana, con 100 espiras de lado $L = 5$ cm, está situada en el plano XY. Si aplicamos un campo magnético dirigido a lo largo del eje Z que varía entre 0,5 T y 0,2 T en el intervalo de 0,1 s:

a) ¿Qué fuerza electromotriz (fem) se inducirá en la bobina?

b) Si ahora el campo permanece constante de valor 0,5 T y la bobina gira en 1 s hasta colocarse en el plano XZ, ¿cuál será la fem inducida en este caso?

c) Si en el caso b), la bobina se desplaza a lo largo del eje Z sin girar, ¿cuál será la fem inducida?

A.1.6. Una bobina circular de 30 vueltas, 4 cm de radio y 15 Ω de resistencia eléctrica, se coloca en un campo magnético dirigido perpendicularmente al plano de la bobina. El módulo del campo magnético varía con el tiempo de acuerdo con la expresión $B = 0,01 \cdot t + 0,04 \cdot t^2$ (unidades SI). Calcula el flujo magnético que atraviesa la bobina en función del tiempo, y la fem y la intensidad de corriente inducidas en la bobina transcurridos 5 s.

A.1.7. A una espira circular de radio 5 cm que descansa en el plano XY se le aplica durante un intervalo de 5 s un campo magnético variable con el tiempo y dirección perpendicular a la superficie de dicha espira de valor $\vec{B} = 0,1 \cdot t \vec{k}$ T, donde t es el tiempo expresado en segundos. ¿Cuánto valdrá el flujo magnético máximo que atraviesa la espira y la fem inducida? Responde a la cuestión anterior en el caso de que la espira estuviera situada en el plano XZ.

A.1.8. Una bobina de 50 vueltas y 10 cm² de sección está situada con su eje paralelo a las líneas de un campo magnético de 1 T.

a) Si el campo disminuye linealmente con el tiempo hasta anularse en 2 s, calcula la fem inducida.

b) Representa gráficamente el campo magnético y la fem inducida en función del tiempo.

c) Si la bobina gira alrededor de un eje normal al campo magnético inicial a la velocidad constante de 10 rad/s, ¿cuál será la expresión de la fem inducida? ¿Cuál será su valor máximo?

2. ¿CÓMO SE PRODUCE LA CORRIENTE ELÉCTRICA ALTERNA? ¿CÓMO SE UTILIZA EN LOS MOTORES ELÉCTRICOS? ¿CÓMO SE TRANSPORTA?

La mayor parte de la energía eléctrica utilizada actualmente se produce mediante generadores eléctricos en forma de corriente alterna (aparatos que transforman energía mecánica en energía eléctrica). Los motores eléctricos transforman de nuevo la energía eléctrica en distintas formas de energía mecánica. Para solucionar los problemas relativos al transporte de esta energía eléctrica a largas distancias se utilizan transformadores. Todos estos aparatos se fundamentan en el fenómeno de la inducción electromagnética.

2.1. GENERADORES ELÉCTRICOS.

El generador de corriente alterna (**alternador**) más simple consiste en una espira que gira con rapidez angular constante en el interior de un campo magnético uniforme producido por un imán o electroimán (figura 6). Los extremos de la espira están enlazados a unos anillos que giran con ella. La conexión eléctrica se realiza mediante escobillas estacionarias en contacto con los anillos. Conforme la espira gira cambia el flujo magnético que la atraviesa, debido a que varía el área efectiva que presenta la espira para ser atravesada por el campo magnético (figura 7). De forma alternativa, decrece y crece dicha área. Cada media vuelta, la corriente inducida en la espira cambia de sentido, originando una corriente alterna.

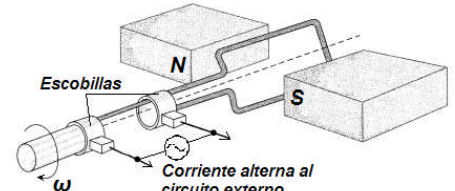


Figura 6

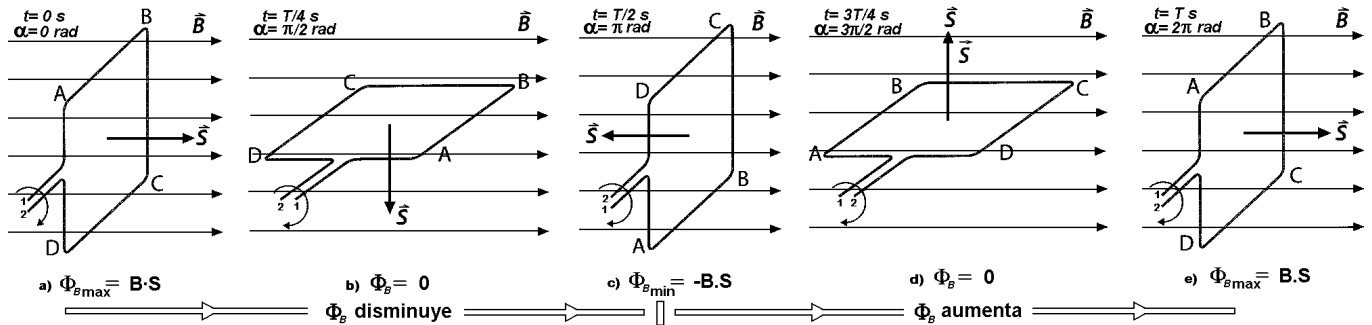


Figura 7

Los generadores de una planta de electricidad son mucho más complejos que el modelo que hemos estudiado aquí. Dichos generadores tienen inmensas bobinas, hechas de un gran número de espiras de alambre devanadas alrededor de un núcleo de hierro. Estas bobinas giran en campos magnéticos muy intensos producidos por potentes electroimanes. La armadura está conectada por el exterior a un conjunto de ruedas de paletas, llamadas turbinas. La rotación de la turbina puede deberse a la energía del viento o a la de una cascada, pero en la mayoría de los casos las turbinas se mueven por medio de vapor. El vapor requiere una fuente de energía; generalmente se usan combustibles fósiles o nucleares.

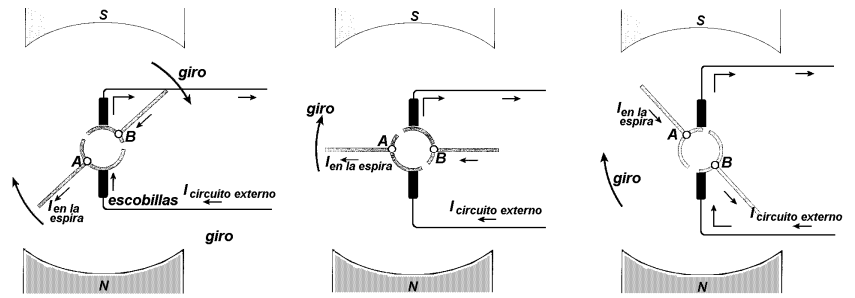
Es importante señalar que se requiere alguna clase de fuente de energía para que funcione un generador. La corriente inducida en las espiras del generador ocasiona la aparición de pares de fuerzas magnéticas que en todo momento se oponen al giro de la espira. En un generador, parte de la energía mecánica que mueve las turbinas se transforma en energía eléctrica que se transmite como una vibración de electrones a lo largo de un conductor.

La fem y la intensidad de corriente inducida en un generador industrial de electricidad oscilan de forma armónica, sinusoidal. Sus valores se deducen de aplicar las leyes de Faraday y de Ohm:

$$\varepsilon_{ind} = -N \frac{\partial \Phi}{\partial t} = -N \frac{\partial (B \cdot S \cdot \cos \alpha)}{\partial t} = -N \frac{\partial (B \cdot S \cdot \cos(\omega t))}{\partial t} = N \cdot B \cdot S \cdot \omega \cdot \text{sen}(\omega t) = \varepsilon_o \cdot \text{sen}(\omega t); \quad I_{ind} = \frac{\varepsilon_{ind}}{R} = \frac{\varepsilon_o}{R} \cdot \text{sen}(\omega t) = I_o \cdot \text{sen}(\omega t)$$

Los valores máximos los podemos expresar en función de la frecuencia de giro de la bobina, de 50 Hz en los países europeos: $\varepsilon_o = N \cdot B \cdot S \cdot \omega = 2\pi f \cdot N \cdot B \cdot S$; $I_o = \varepsilon_o / R$. No obstante, al oscilar los valores de ε_{ind} y de I_{ind} entre dos valores extremos, se precisa conocer qué valor medio de corriente alterna equivale al de una corriente continua que, con la misma resistencia eléctrica y durante el mismo tiempo, intercambia la misma cantidad de energía que dicha corriente alterna. Los aparatos de medida detectan un valor eficaz para la corriente alterna que equivale al 71% del valor máximo: $\varepsilon_{ind_eficaz} = \varepsilon_o / \sqrt{2}$ o $I_{ind_eficaz} = I_o / \sqrt{2}$.

A partir de un generador eléctrico por inducción también podemos producir corriente continua (el dispositivo se llama entonces **dinamo**). Basta conectar los terminales de la bobina a un anillo partido o conmutador (figura 8). La corriente suministrada es continua pero de intensidad variable (entre un valor máximo y cero). Este problema de la fluctuación de la corriente (algo que no ocurre en las pilas) se soluciona haciendo que giren numerosas bobinas y utilizando un conmutador de muchos segmentos.



En el giro, los terminales de la bobina cambian de escobilla al tiempo que se invierte el sentido de la corriente.

Figura 8

2.2. TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS.

Desde las primeras aplicaciones prácticas de la electricidad se observó que, al transportar la energía eléctrica a largas distancias, se producían transformaciones energéticas no deseadas en los cables conductores, en forma de calor por efecto Joule (recalentamiento de los cables eléctricos a causa de la resistencia que éstos ofrecen al paso de la corriente). La potencia degradada en forma de calor a lo largo de una red de conducción eléctrica es: $P = I^2 \cdot R = I \cdot \Delta V$; por tanto, para minimizar este efecto, tenemos dos opciones:

- Disminuir la resistencia R del cable conductor. Se consigue aumentando la sección del mismo, pero ello supone un aumento del coste de la instalación (aumenta la cantidad de metal a utilizar y es mayor el peso que tienen que soportar las líneas de transmisión).
- Disminuir la intensidad de la corriente I que circula por el conductor. Esta opción implica, si queremos mantener la potencia eléctrica suministrada, aumentar el voltaje o tensión de la red. La solución la encontró Nikola Tesla (1856-1943) al construir el primer transformador capaz de aumentar o disminuir el voltaje de la corriente eléctrica, basándose en el fenómeno de la inducción electromagnética. Para transportar la energía eléctrica, se eleva el voltaje de los 26.000 V a la salida del generador hasta un máximo de 800.000 V, para volver a bajar la tensión llegados a los lugares de consumo (a 33.000 V para la industria pesada, a 380 V para los talleres, a 220 V para los consumidores domésticos).

El **transformador** se basa en la inducción mutua de dos bobinas enrolladas al mismo núcleo de hierro laminado³ y aisladas entre sí (figura 10). La variación temporal de una corriente eléctrica alterna en la bobina primaria (inductora), con N_1 espiras, produce un campo magnético variable cuyas líneas de campo actúan sobre la bobina secundaria (inducida), con N_2 espiras, creando en ella una corriente eléctrica alterna distinta, mayor (elevador o transformador de alta) o menor (reductor o transformador de baja) en función de la relación entre las espiras. Teniendo en cuenta la ley de Faraday y suponiendo que la degradación de energía en el transformador por efecto Joule es despreciable, resulta:

$$\varepsilon_{\text{primario}} = -N_1 \frac{\partial \Phi}{\partial t}; \quad \varepsilon_{\text{secundario}} = -N_2 \frac{\partial \Phi}{\partial t}; \quad \text{dividiendo miembro a miembro: } \frac{\varepsilon_{\text{primario}}}{\varepsilon_{\text{secundario}}} = \frac{N_1}{N_2}; \quad \text{o lo que es equivalente: } \frac{\Delta V_1}{\Delta V_2} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_1}{N_2}.$$

que es equivalente: $\frac{\Delta V_1}{\Delta V_2} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_1}{N_2}$.

El fenómeno de la inducción mutua entre bobinas que se da en el transformador eléctrico sólo es aplicable a la corriente alterna, ya que las corrientes eléctricas continuas no generan campos magnéticos variables y por ello no produce corrientes inducidas. Esta fue una de las causas de que la corriente alterna ganara la batalla a los partidarios de la corriente continua.

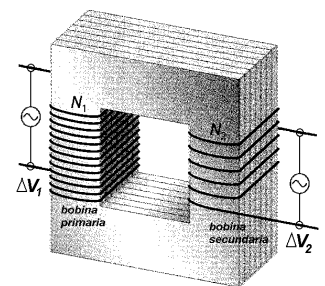


Figura 10

³ Los núcleos de hierro de los transformadores están formados por láminas aisladas en vez de trozos de hierro continuos, con el fin de evitar las corrientes inducidas en la masa metálica, llamadas corrientes de Foucault, que transformarían energía eléctrica en calor por efecto Joule. Estas corrientes se forman por circulación de los electrones dentro del material sometidos a campos magnéticos variables; a menudo son de elevada intensidad debido a la baja resistencia eléctrica del metal.

Las corrientes de Foucault, aunque indeseables en los transformadores, tienen importantes aplicaciones: calentamiento y fusión de materiales de hierro situados dentro de un campo magnético que oscila bruscamente, cocinado de alimentos, etc.

El cocinado de alimentos mediante la inducción ha sido desarrollado por la empresa Balay, perteneciente al grupo empresarial alemán BSH. El fogón dispone de una bobina de forma plana preparada para que tenga una tensión muy alta, por lo que la corriente que circula por ella genera un intenso campo magnético que provoca dos reacciones en los recipientes ferromagnéticos (de hierro o acero) que se colocan encima: 1º induce corrientes de Foucault en el recipiente, al incorporar éste materiales eléctricamente resistentes, con lo que se calienta, igual que una bombilla o un aparato de calefacción eléctrica; 2º induce la orientación de los dominios magnéticos, pero, al ser la corriente eléctrica alterna, el constante cambio de polaridad provoca dentro del material una intensa fricción que también contribuye a calentarlo. Gracias a este doble efecto la cocina por inducción alcanza rendimientos energéticos superiores a la cocina tradicional (un 72% de eficiencia frente al 51% de una cocina a gas o al 41,4% de una cocina eléctrica convencional. Además, es un sistema muy seguro: puedes poner las manos encima de la cocina sin quemarte ni sentir calor.

Aunque la energía eléctrica es limpia, su producción y transporte tiene cierto impacto ambiental (contribuye al efecto invernadero, a la lluvia ácida,...).

2.3. MOTORES ELÉCTRICOS.

En casa tenemos decenas de motores eléctricos: batidoras, maquinillas de afeitar, secadores de pelo, ventiladores, lavadoras,... En esencia, el funcionamiento de un motor eléctrico es justamente el contrario al del generador eléctrico: convierten la corriente eléctrica en campos magnéticos, los cuales, a su vez, causan un movimiento rotatorio útil.

Ya vimos al finalizar la unidad anterior (apartado 2.2.2) que una espira de corriente en un campo magnético experimenta un par de fuerzas que tiende a hacer girar la espira hasta que su plano sea perpendicular al campo magnético. Si la corriente suministrada a la espira fuera continua, el par de fuerzas cambiaría de sentido al ponerse la espira vertical. La espira oscilaría entorno a esta posición de equilibrio y eventualmente alcanzaría el reposo. Sin embargo, si el sentido de la corriente se invierte justo cuando la espira pasa por la posición vertical, el par de fuerzas magnéticas no cambia de sentido y continúa haciendo que la espira gire (figura 9).

La mayoría de los motores son más complejos que el descrito arriba. Lo normal es que un motor incorpore múltiples conjuntos de imanes, o varios electroimanes sincronizados. La variada combinación entre los componentes básicos hace que los motores giren a una velocidad constante, den una alta torsión o volteen poco a poco. Sin embargo, en cada caso, el principio físico es el mismo: la electricidad es transformada en campos magnéticos y éstos causan un movimiento rotatorio útil.

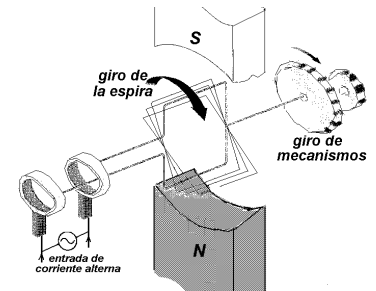


Figura 9

A.2. Resuelve las siguientes actividades:

A.2.1. Una bobina consta de 1.000 espiras circulares de 2 cm de radio y tiene una resistencia eléctrica de 8Ω . La bobina permanece inmóvil dentro de un electroimán que gira a su alrededor con una frecuencia de 50 Hz, creando un campo magnético uniforme de 0,1 T. Si en el instante inicial el plano de las espiras es perpendicular al campo magnético, determina las expresiones del flujo magnético, de la fem inducida eficaz y de la intensidad de corriente inducida eficaz, y representa gráficamente estas magnitudes frente al tiempo. A la vista de las gráficas, razona: ¿qué valores máximos toma la fem y la intensidad eficaces, y a qué posiciones de la bobina corresponden?; ¿en qué posiciones se anula la fem y la intensidad eficaces?

¿Cómo podemos conseguir que la fem máxima eficaz sea de 220 V? Si mantenemos la frecuencia de giro y la intensidad del campo magnético, ¿qué cantidad de espiras debería llevar la bobina para conseguir los 220 V?

A.2.2. Si la bobina de un generador consta de 100 espiras de 500 cm^2 y gira en un campo magnético de 0,6 T, ¿qué velocidad angular debe tener para generar un voltaje eficaz máximo de 150 V? ¿Cuál será la frecuencia de oscilación de la corriente?

A.2.3. Cita los diferentes tipos de centrales que se utilizan actualmente para obtener energía eléctrica, y elabora una tabla donde se muestren ventajas e inconvenientes de cada una de ellas, sobre todo en relación con su impacto ambiental.

A.2.4. ¿Qué transformación energética realiza un motor eléctrico? Explica cómo funciona un motor eléctrico sencillo.

A.2.5. a) ¿Qué es un transformador y por qué son útiles para el transporte de energía eléctrica? b) Si el primario de un transformador tiene 1.210 espiras y el secundario 33 espiras, ¿qué tensión habrás de aplicar al primario para tener a la salida del secundario 6 V? Si la intensidad de corriente en el primario es 20 A, ¿qué corriente circulará en el secundario?

A.2.6. Una central de alta tensión de 200 kV transporta energía eléctrica desde la central hasta la ciudad. a) Explica por qué el transporte de energía se realiza a tan altas tensiones. b) Para reducir esta tensión hasta su valor de consumo doméstico, 220 V, se emplea un único transformador con 20 espiras en el circuito secundario. ¿Cuántas espiras debe tener el primario?

3. ¿EN QUÉ CONSISTE LA SÍNTESIS ELECTROMAGNÉTICA DE MAXWELL? UNIFICACIÓN DE ELECTRICIDAD, MAGNETISMO Y ÓPTICA.

Hasta aquí hemos estudiado la inducción electromagnética en términos de producción de voltajes y corrientes. Pero, de hecho, detrás de los voltajes y las corrientes está el propio campo eléctrico. Si al variar el flujo del campo magnético a través de una espira se induce en ella una corriente, debemos admitir que se crea un campo eléctrico que arrastra a los electrones por la espira (figura 11). Ahora bien, esto ocurrirá haya o no haya conductor por el que circule corriente. La forma más general de establecer la ley de Faraday es:

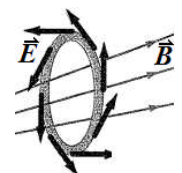


Figura 11

Se induce un campo eléctrico en toda región del espacio en la que exista un campo magnético que varíe con el tiempo. La magnitud del campo eléctrico inducido es proporcional a la rapidez con la que cambia el campo magnético. La dirección del campo eléctrico inducido es perpendicular al campo magnético variable.

A partir de esta concepción general de la inducción y tomando como base la notable simetría que muestran las relaciones entre campos eléctricos y magnéticos, el físico británico James Clerk Maxwell supuso que un campo eléctrico variable debía inducir un campo magnético:

Se induce un campo magnético en toda región del espacio en la que exista un campo eléctrico que varíe con el tiempo. La magnitud del campo magnético inducido es proporcional a la rapidez con la que cambia el campo eléctrico. La dirección del campo magnético inducido es perpendicular al campo eléctrico variable

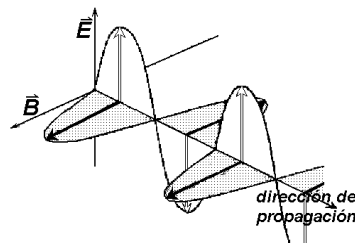
Estos enunciados son dos de los más importantes de la física. Ponen claramente de manifiesto que el campo eléctrico y el campo magnético son dos aspectos de una misma realidad, el **campo electromagnético**. Pero además, como vamos a ver a continuación, se encuentran en la base de nuestra comprensión de las ondas electromagnéticas.

Si agitas de un lado a otro el extremo de una vara en agua en reposo produces ondas en la superficie. Análogamente, si agitas una barra cargada de un lado a otro en el espacio vacío produces ondas electromagnéticas en el espacio (figura 12). Esto se debe a que la carga que agitas se puede considerar como una corriente eléctrica. ¿Qué cosa rodea a una corriente eléctrica? Un campo magnético. ¿Qué cosa rodea a una corriente eléctrica variable? Un campo magnético variable. ¿Qué sabemos acerca de un campo magnético variable? Que induce un campo eléctrico variable, de acuerdo con la ley de Faraday. ¿Qué sabemos acerca de un campo eléctrico variable? De acuerdo con el enunciado de Maxwell, contraparte de la ley de Faraday, un campo eléctrico variable induce un campo magnético variable.



Figura 12

Una **onda electromagnética** (oem) se compone de campos eléctricos y magnéticos vibrantes que se regeneran mutuamente. No se requiere medio alguno. Los campos vibrantes emanan (o sea, surgen) de la carga vibrante. En todo punto de la onda, el campo eléctrico es perpendicular al campo magnético y ambos son perpendiculares a la dirección de propagación de la onda. Se trata por tanto de una onda transversal (figura 13).



En las ondas electromagnéticas, la naturaleza ondulatoria se debe a la variación de los valores de campo eléctrico (\vec{E}) y magnético (\vec{B}) a lo largo de una dirección de propagación. Al representar dichas variaciones, obtenemos esa representación que nos resulta tan familiar, pero que no tiene nada que ver con ningún movimiento de partículas del medio material, que, además, en el caso de la onda electromagnética, no tiene por qué existir.

Figura 13

Este razonamiento llevo a Maxwell a suponer que una carga que oscila, o en general, una carga que está acelerada, crea una onda electromagnética. Utilizando las expresiones del campo eléctrico y del campo magnético creados por una carga en movimiento: $\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q}{r^2} \cdot \vec{u}_r$ (1); $\vec{B} = \frac{\mu}{4\pi} \frac{q(\vec{v} \wedge \vec{u}_r)}{r^2}$ (2) (figura 14); llegó a deducir la ecuación de este tipo de ondas y a predecir su velocidad de propagación.

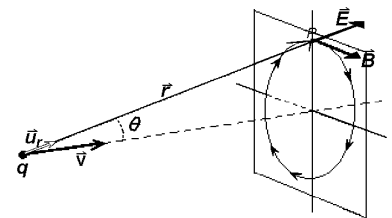
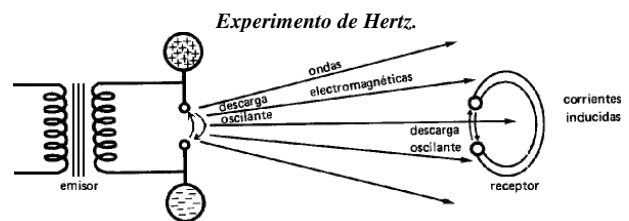


Figura 14

Despejando \vec{u}_r en (1) y sustituyendo en (2) se llega a: $\vec{B} = \mu \cdot \epsilon \cdot (\vec{v} \wedge \vec{E}) = \frac{1}{v^2} (\vec{v} \wedge \vec{E})$, donde $v = \frac{1}{\sqrt{\mu \cdot \epsilon}}$ es

una constante que tiene las dimensiones de una velocidad. Representa la velocidad de propagación de una onda electromagnética en un medio de constante dieléctrica ϵ y permeabilidad magnética μ . El hecho de que su valor en el vacío sea de $c=3 \cdot 10^8$ m/s, coincidente con el de la luz visible, llevó a Maxwell a afirmar que la luz era un tipo más de onda electromagnética.

No obstante, para que esta afirmación quedase verificada era necesario producir y detectar ondas electromagnéticas en el laboratorio y esto fue lo que consiguió en 1.887 Heinrich Hertz con su resonador, 14 años después de que Maxwell publicara sus trabajos (figura 15). Las ondas hertzianas se aplicaron a la telegrafía sin hilos (Popov, en 1.895), a la emisión radiofónica (Marconi, en 1.901), a la televisión, al radar y a las comunicaciones por satélite.



El emisor estaba constituido por dos esferas conectadas a un par de cables que llevaban a una bobina. La corriente alterna inducida en la bobina comunica a las esferas una gran cantidad de carga de signo opuesto, llegando a saltar una chispa entre ellas. Por efecto de la bobina, la descarga era oscilante. Si los argumentos de Maxwell eran correctos, debería propagarse a través del aire una onda electromagnética de la misma frecuencia con la que oscilaba el circuito.

El receptor para detectar estas ondas estaba constituido por un trozo de cable curvado en forma de círculo, con dos esferas en sus extremos, de forma que, estando muy próximas, pudiese saltar la chispa entre ellas, al reproducirse en el receptor la oscilación del emisor.

Hertz fue capaz de detectar estas ondas electromagnéticas aún cuando el receptor estuviese separado muchos metros del emisor. Comprobó, además, que un espejo cóncavo era capaz de hacerlas converger (como ocurre con las ondas luminosas) y, en definitiva, verificó las principales predicciones de la teoría de Maxwell.

Figura 15

La comprobación experimental de la existencia de ondas electromagnéticas mediante su generación y detección, llevo a aceptar la naturaleza electromagnética de la luz, dio el espaldarazo definitivo a la teoría electromagnética de Maxwell y supuso la integración de la Óptica como una parte del Electromagnetismo. Esta unificación, conocida como síntesis electromagnética de Maxwell, constituye el último éxito de lo que se ha denominado Física clásica, y su importancia es similar a la que tienen las leyes de Newton en Dinámica. Con ligeras variantes introducidas por las teorías cuántica y relativista, aún perdura en la actualidad, constituyendo uno de los mayores logros del pensamiento científico.

A.3. Responde a las siguientes cuestiones:

A.3.1. ¿Qué es lo que vibra realmente en una onda electromagnética?

A.3.2. ¿En qué consiste la síntesis electromagnética de Maxwell?

3.1. EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO.

En tiempos de Maxwell la luz y las radiaciones infrarrojas y ultravioletas que la acompañan eran los únicos tipos de radiaciones electromagnéticas conocidos. Hoy en día el **espectro⁴ electromagnético** (figura 16) abarca una amplia gama de diferentes clases de radiaciones provenientes de variedad de fuentes.

Todas las ondas electromagnéticas comparten características comunes:

- Se originan por cargas eléctricas aceleradas, por oscilaciones eléctricas, no materiales.
- Pueden describirse en términos de campos eléctricos y magnéticos variables, perpendiculares entre sí, que se propagan por el espacio, perpendicularmente a las direcciones de oscilación de los campos (figura 13).

Los vectores \vec{E} y \vec{B} varían sinusoidalmente con la posición y el tiempo: $E = E_0 \cdot \text{sen}(\omega t - kx)$;

$B = B_0 \cdot \text{sen}(\omega t - kx)$, donde $\omega = 2\pi\nu = 2\pi / T$ y $k = 2\pi / \lambda$. Las ondas armónicas representadas por E y B se propagan en fase y sus elongaciones en una posición y en un instante dados están relacionadas por la ecuación: $E = v \cdot B$, donde v es la velocidad de propagación de una onda electromagnética en un medio de constante dieléctrica ϵ y permeabilidad magnética μ . En el vacío: $v = c = 3 \cdot 10^8$ m/s, y por tanto, $E = c \cdot B$.

La intensidad de una onda electromagnética es proporcional al cuadrado de la amplitud de la perturbación que se propaga (el propio campo eléctrico y magnético). Puede expresarse en cualquiera de estas formas:

$$I = c \cdot \epsilon \cdot B^2 = c \cdot E^2 / \mu = E \cdot B / \mu .$$

- Como cualquier onda, se caracterizan por la frecuencia (f, ν). Recuerda que la frecuencia depende de la fuente que origina las ondas y que permanece invariable al cambiar de medio de propagación. Dada la relación: $v = \lambda \cdot \nu$, al cambiar de medio cambia la velocidad y, por consiguiente, la longitud de onda. A pesar de ello, suele utilizarse la longitud de onda en el vacío ($\lambda_0 = c/\nu$) para caracterizar una onda electromagnética.
- Como cualquier onda, transportan energía. Pero las ondas electromagnéticas, a diferencia de las mecánicas, no requieren soporte material para el transporte (por eso también se llaman rayos o radiaciones) y la energía transferida es directamente proporcional a la frecuencia de la onda (y no al cuadrado de la frecuencia, como ocurría en las ondas mecánicas, ver bloque 1, unidad 2, apartado 3.3): $E = h \cdot \nu$ (h es la constante de Planck, $6,63 \cdot 10^{-34}$ J·s).

Aunque las ondas electromagnéticas difieren en gran manera en cuanto a sus propiedades, sus medios de producción, y las maneras en que las

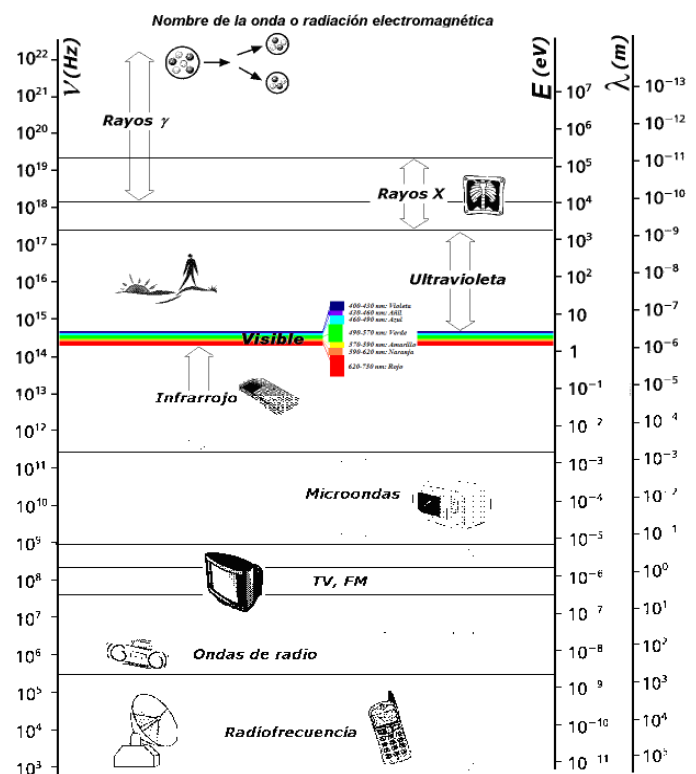


Figura 16

⁴ El término **espectro** procede del latín spectrum, que significa "forma" o "aparición". Entre las muchas otras palabras que provienen de la misma raíz se encuentran: "espectáculo" y "especie". Newton introdujo el término para describir la imagen que resultaba cuando un haz de luz solar atravesaba un prisma de vidrio. Hoy día nos referimos al espectro electromagnético para indicar las muchas clases diferentes de radiación electromagnética, clasificadas de acuerdo con su frecuencia o longitud de onda en una escala de pequeña a grande. Hablamos también del espectro político, que indica similarmente la amplia gama de puntos de vista políticos en una escala que va desde lo ultraconservador hasta lo ultraliberal.

observamos⁵, la diferencia fundamental entre ellas es su frecuencia de propagación. Aparte de esta diferencia en sus frecuencias, no existe una manera experimental de distinguir una onda en la región visible de otra en la región infrarroja; las ondas tienen formas idénticas y descripciones matemáticas idénticas. No existen espacios en el espectro, como tampoco límites bien definidos entre las diversas categorías (*cuadro 1*). (Ciertas regiones del espectro están asignadas por la ley para usos comerciales u otros usos, tales como la transmisión por TV, AM o FM).

Cuadro 1. Radiaciones del espectro electromagnético (de menor a mayor frecuencia).

Ondas de radio u ondas hertzianas (λ de varios km a cm).

Se producen por corrientes eléctricas oscilantes en circuitos electrónicos. Reciben distintos nombres según su frecuencia. Se utilizan en telecomunicaciones.

Viajando al exterior a la velocidad de la luz, el frente expansivo de las ondas de las señales de TV transmitidas en la Tierra desde alrededor de 1950 ha llegado ahora a 400 estrellas aproximadamente, portando información a sus habitantes, de haberlos, con respecto a nuestra civilización.

De fuentes extraterrestres nos llegan ondas de radio, siendo el Sol una fuente principal que a menudo interfiere con la recepción de radio o de TV en la Tierra. Júpiter es también una fuente activa de emisiones de radio. El trazado de mapas de las emisiones de radio procedentes de fuentes extraterrestres, una ciencia conocida como radioastronomía, ha proporcionado información acerca del Universo que no suele obtenerse mediante el uso de telescopios ópticos. Además, puesto que la atmósfera de la Tierra no absorbe mucho las longitudes de onda de radio, la radioastronomía proporciona ciertas ventajas sobre la astronomía óptica, o infrarroja, o de microondas en la Tierra.

Microondas (λ de 1 m a 1 mm).

Pueden considerarse como ondas cortas de radio, producidas también con osciladores electromagnéticos en circuitos eléctricos.

Se emplean para transmitir conversaciones por teléfono, en sistemas de radar o en la banda UHF de televisión, así como para el estudio de las propiedades atómicas y moleculares de la materia.

Como aplicación doméstica, mencionar el horno microondas, donde se aprovecha la fácil absorción de la energía de las microondas por las moléculas del agua presentes en los alimentos, por resonancia (*ver apéndice 2*).

Infrarrojos (λ de 1 mm a $0,7 \mu\text{m}$).

Se emite comúnmente por átomos o moléculas cuando cambian su movimiento vibratorio o rotatorio. Este cambio supone a menudo un cambio en la energía interna (temperatura) del objeto emisor y se observa como un cambio en la energía interna (temperatura) del objeto que detecta la radiación. En este caso, la radiación infrarroja es un medio importante de transferencia de calor. El calor que sentimos al acercar la mano a un foco encendido es primordialmente resultado de la radiación infrarroja emitida por el foco y absorbida por la mano.

Todos los objetos emiten radiación electromagnética debido a su temperatura. Cuando la temperatura de un objeto está comprendida entre 3 K y 3000 K emite su radiación electromagnética más intensa en la región infrarroja del espectro. En astronomía la observación infrarroja proporciona información complementaria a la obtenida de la radiación visible. Prácticamente la mitad de la energía que recibimos del Sol es de este tipo.

Se utiliza en terapia física, en fotografía infrarroja y espectroscopía de vibraciones.

La luz (λ de 750 –rojo- a 400 nm -violeta, comprendiendo todos los colores del arco iris).

Es la radiación electromagnética más intensa emitida por el Sol, la fuente extraterrestre más cercana, y la más familiar para nosotros, porque disponemos de receptores (los ojos) sensibles a ella.

La luz se emite a menudo cuando los electrones exteriores de átomos y moléculas cambian su estado de movimiento; por esta razón, estas transiciones en el estado del electrón se llaman transiciones ópticas.

La luz visible es la base de la óptica y de los instrumentos ópticos que estudiaremos en el tema siguiente.

Ultravioleta (λ de 400 a 1 nm).

Se produce por saltos electrónicos en átomos y moléculas excitados; su energía es suficiente para romper enlaces químicos o producir ionizaciones.

El Sol es una importante fuente de luz UV y ocasiona el bronceado de la piel, aunque una dosis excesiva resulta peligrosa. Afortunadamente, el ozono estratosférico detiene la mayor parte de la radiación UV, de aquí el grave problema que plantea para la vida en la Tierra la disminución del espesor de la capa de ozono a causa, fundamentalmente, de los compuestos clorofluorocarbonados liberados por los aerosoles, los equipos de refrigeración y otras fuentes.

La astronomía del ultravioleta se lleva a cabo usando observatorios transportados por satélites fuera de la atmósfera terrestre.

Su capacidad para destruir gérmenes nocivos hace que pueda emplearse para esterilizaciones.

Rayos X (λ de 10 nm a 0,001 nm).

Se originan, por regla general, al bombardear una placa metálica con electrones de alta energía. Son producidos por los electrones que están más fuertemente ligados al átomo.

Las longitudes de onda de los rayos X corresponden aproximadamente al espaciado entre los átomos de los sólidos; por lo tanto, el método de difracción de rayos X es útil para determinar redes cristalinas. Los rayos X pueden penetrar fácilmente en tejidos blandos, pero son detenidos por los huesos y otras materias sólidas; por esta razón han encontrado un uso amplio en

⁵ Para la detección de ondas electromagnéticas distintas a la luz visible se requiere de otros instrumentos, pues para nuestros ojos son invisibles: circuitos electrónicos (ondas de radio), cristales (microondas), bolómetros y termopilas (rayos infrarrojos), células fotoeléctricas (rayos ultravioletas), cámaras de ionización y películas fotográficas (rayos X), y contadores de centelleo y Geiger (rayos gamma).

los diagnósticos médicos (radiografías). Su elevada energía los hace especialmente peligrosos, por lo que las dosis aplicadas en radiografías se miden muy cuidadosamente.

La astronomía de rayos X, al igual que la astronomía del ultravioleta, se efectúa con observatorios en órbita. La mayoría de las estrellas, como el Sol, no son emisoras potentes de rayos X; sin embargo, en ciertos sistemas que constan de dos estrellas vecinas que giran alrededor de su centro de masa común (los llamados sistemas binarios), el material de una estrella puede calentarse y acelerarse mientras cae en la otra, emitiendo rayos X en el proceso. Si bien no se dispone aún de una prueba que lo confirme, se cree que el miembro más masivo de ciertas binarias de rayos X debe ser un agujero negro.

Rayos gamma (λ de menos de 10 pm).

Su origen reside en el núcleo atómico. Se producen en las desintegraciones radiactivas y en el transcurso de reacciones nucleares, como las que tienen lugar en los reactores nucleares de fisión. También se encuentran en los rayos cósmicos.

Al ser absorbidos por un ser vivo producen graves efectos, como mutaciones e incluso la muerte. No obstante, han encontrado curiosamente gran utilidad en la radioterapia para combatir las células cancerosas. Su manipulación requiere protecciones muy especiales.

A.4. Una onda electromagnética plana sinusoidal, de 2 MHz de frecuencia, se desplaza por el vacío en el sentido del eje X. El campo eléctrico tiene una amplitud máxima de 500 N/C y vibra en el eje Y.

- Calcula la longitud de onda y el período. ¿A qué zona del espectro electromagnético pertenece dicha onda?
- Halla la amplitud máxima del campo magnético e indica su dirección de propagación.
- Escribe las ecuaciones de los campos eléctricos y magnéticos correspondientes de la citada onda.

A. Final. Realiza un resumen de las ideas más importantes aprendidas en esta unidad, así como un cuadro con las ecuaciones y fórmulas que has manejado a lo largo de la misma.

APÉNDICES.

A.1. APLICACIONES DE LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS.

En una primera descripción del campo electromagnético se puede decir que es una superposición de los campos eléctrico y magnético, aunque hay que tener en cuenta, además, que no son independientes entre sí, sino que cada uno de ellos depende de las variaciones del otro. La inducción electromagnética es un ejemplo de ello.

El campo electromagnético se propaga en el espacio, esté ocupado de medio material o no, con una determinada velocidad, pudiendo caracterizarse matemáticamente mediante una onda electromagnética. Los estudios realizados han permitido caracterizar todas las formas conocidas de campo electromagnético, el llamado espectro electromagnético, en función de la frecuencia o la longitud de onda de la onda que lo caracteriza.

Comunicaciones.

En cada una de las categorías del espectro se han conseguido avances importantes a lo largo del siglo pasado y lo que llevamos del actual siglo XXI. En algunos casos, el avance ha supuesto el desplazamiento en el espectro de la onda electromagnética utilizada, como en el caso de las **telecomunicaciones**. En poco más de un siglo, por ejemplo, hemos pasado de comunicarnos mediante el telégrafo (campos casi estáticos) a hacerlo mediante la telefonía fija (dentro de las radiofrecuencias) y, actualmente, con la móvil (en la banda de las microondas). En menos de una década, el teléfono móvil se ha convertido en un aparato versátil que puede funcionar además de como teléfono, como fax, como cámara de fotos e incluso como ordenador, permitiéndonos conexión a Internet.

Pero los últimos avances en el terreno de las comunicaciones no se circunscriben a conseguir buenos equipos de emisión y recepción sino que también se dirigen hacia conseguir mejorar la transmisión entre unos y otros. En este sentido hay dos aspectos dignos de resaltar:

- Por un lado, la instalación de redes de repetidores y radioenlaces, tanto terrestres como desde satélites, cada vez más sofisticados, hacen posible una cobertura de las comunicaciones prácticamente mundial.
- Por otro, y puesto que no se trata sólo de establecer la comunicación sino de hacerlo en el momento y con la fluidez deseados, se desarrollan medios alternativos de transmisión capaces de conseguirlo, como las redes de cable de fibra óptica, en la que el soporte de la información se deja a cargo de la banda visible del espectro electromagnético. Se busca actualmente conseguir mayores anchos de banda de transmisión, es decir, mayor número de comunicaciones simultáneas en un mismo canal físico.

Estudio del universo.

La detección cada vez más precisa de ondas electromagnéticas y la capacidad de análisis de las mismas está permitiendo importantísimos avances en un campo tan aparentemente distante de las comunicaciones en la tierra como es el estudio del universo y de sus orígenes. Se están construyendo telescopios con capacidad cada vez mayor para la reproducción de imágenes a partir de señales electromagnéticas fuera de la banda visible del espectro. Sondas espaciales, extraordinariamente sensibles, se están mandando cada vez más lejos para ampliar la información que el universo transmite en forma de ondas electromagnéticas como consecuencia de su actividad. Así conocemos, analizando el espectro visible, la composición de las estrellas o la forma en la que se expande el universo, o, analizando la radiación de fondo, hasta el propio origen del mismo.

Campos muy débiles y campos muy elevados.

Se están realizando avances relacionados con las aplicaciones del campo electromagnético casi estático, sobre todo en su faceta de campo magnético y en sus niveles extremos de intensidad, es decir, para campos magnéticos muy débiles y para campos magnéticos muy elevados.

En el primer caso, con campos magnéticos muy débiles, se han conseguido sistemas que miden inducciones magnéticas del orden de 10^{-11} T, esto es, dos diezmilionésimas partes del campo magnético terrestre. Estas sensibilidades permiten medir la acti-

vidad magnética del propio cuerpo humano, lo que está abriendo las puertas al desarrollo de nuevas tecnologías de diagnóstico médico alternativas a los actuales electrocardiogramas y electroencefalogramas, que, aún en vías de desarrollo, se conocen con el nombre de **magnetocardiograma** y **magnetoencefalograma**. El problema que surge a la hora de realizar estas medidas es el apantallamiento del resto de los campos magnéticos, normalmente más intensos, superpuestos a los que realmente se quiere medir.

En cuanto a los campos magnéticos muy elevados también nos encontramos aplicaciones dentro del terreno de la medicina que permiten, desde hace algún tiempo, diagnosticar enfermedades mediante la técnica conocida como **resonancia magnética nuclear**, en la que se consiguen imágenes perfectamente nítidas de los tejidos sometiendo al paciente a campos magnéticos por encima de las 4 T. Estos elevados campos magnéticos sólo pueden conseguirse utilizando corrientes eléctricas muy por encima de las que soportan los conductores normales a causa de la disipación por efecto Joule en sus resistencias, por lo que se hace necesario el uso de bobinas superconductoras que tienen como características fundamentales: resistencia eléctrica nula (es un conductor perfecto) y permeabilidad nula (es un diamagnético perfecto, es decir, un medio material que no admite campo magnético en su interior). Estas propiedades las adquiere el superconductor cuando es enfriado a temperaturas cercanas al cero absoluto.

Otras aplicaciones de los campos magnéticos elevados son los **aceleradores de partículas** que básicamente consisten en un largo túnel, a menudo circular, en ocasiones de longitudes del orden de decenas de kilómetros, en los que las partículas cargadas son aceleradas por la fuerza de Lorentz debida a un campo magnético constante a lo largo de todo el túnel. También en este caso el campo magnético se consigue utilizando bobinas superconductoras. Las velocidades que se alcanzan pueden llegar a ser próximas a la de la luz, con lo cual estos sistemas permiten no sólo el estudio de la materia al nivel de partículas elementales, sino también de algunos fenómenos de origen relativista.

Superconductores.

El uso de superconductores, que como se ha visto ha sido la pieza clave para la mejora de los sistemas que utilizan campos magnéticos altos, permite concebir nuevos sistemas alternativos a otros existentes basados en tecnologías tradicionales. Como ejemplo, mencionaremos los sistemas de **almacenamiento de energía** (SMES) y los **sistemas de levitación magnética** (MAGLEV).

Los SMES almacenan energía sobre un campo magnético establecido por una corriente eléctrica en una bobina superconductora en cortocircuito. El proceso es análogo al almacenamiento de energía sobre un campo eléctrico establecido por una diferencia de potencial entre las armaduras de un condensador. Nunca se había podido almacenar energía en una bobina durante un período de tiempo suficiente, a causa de la disipación que se producía en la resistencia de las bobinas conductoras normales, hecho que con la bobina superconductora no ocurre.

Por último, si los SMES utilizan del superconductor la ausencia de resistencia, los MAGLEV utilizan su diamagnetismo total. Si se intenta situar un imán permanente o un electroimán sobre un superconductor, éste expulsará de su interior el campo magnético del imán ejerciendo sobre él una fuerza que en las condiciones adecuadas de equilibrio lo hará levitar. Esta propiedad está siendo muy estudiada para evitar los rozamientos y suavizar el trazado en las líneas de trenes de alta velocidad, existiendo un buen número de prototipos ya resueltos que, de momento, no se ponen en servicio, debido al alto coste en el mantenimiento de los sistemas superconductores a causa de la necesaria refrigeración. En la actualidad se sigue investigando para hacer estos materiales más rentables en el terreno económico, tratando de aumentar la temperatura a la cual se comportan como superconductores.

A.2. EL HORNO MICROONDAS.

El horno de microondas es mucho más rápido que los hornos convencionales (eléctricos, de gas). Las microondas son una parte del espectro electromagnético. Con una longitud de onda entre 30 cm y 1 mm, se encuentran entre las ondas de radiofrecuencia y las infrarrojas. Además de su uso en hornos, también se utilizan en telecomunicaciones y en sistemas de detección de objetos (radar).

La cocción de alimentos en el horno de microondas se fundamenta en dos aspectos diferentes:

- La acción que ejercen sobre las moléculas de agua (y de aceites y grasas): las microondas provocan una elevada vibración de estas moléculas (de hecho, casi todos los alimentos contienen agua); esta agitación molecular da lugar a un aumento de la temperatura de la comida que se somete a las microondas. En definitiva, la energía de las microondas es absorbida y se transforma en calor.
- Su poder de penetración. Los hornos convencionales calientan las sustancias desde la superficie y, por conducción, el calor se transmite al resto de la comida, lo cual es un proceso lento. Las microondas afectan directamente un espesor de unos 2,5 cm del alimento, medidos desde su superficie; el resto de la sustancia se calienta por conducción. Este poder de penetración explica por qué calienta los alimentos con tanta rapidez.

Esta rapidez contribuye a un ahorro energético, especialmente cuando se trata de calentar pequeñas cantidades de alimentos. En un sistema convencional parte de la energía se invierte en calentar el recipiente; esta energía no es necesaria en el horno de microondas puesto que él calienta directamente la comida: la energía eléctrica se transforma en energía radiante de las microondas y ésta se transforma en calor en el alimento.

Como todas las ondas, las microondas experimentan la reflexión; por tanto, se entiende que los recipientes a utilizar en el horno de microondas no deben reflejarlas. Se pueden utilizar materiales transparentes a las microondas: vidrio, plásticos, porcelana... y es preferible que sean redondos u ovalados, sin esquinas agudas ya que éstas pueden concentrar la radiación y dar lugar a zonas de mayor calentamiento que otras y, en definitiva, una cocción irregular. Nunca hay que utilizar recipientes metálicos.

¡APROVECHA LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS!

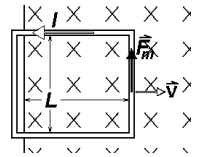
Aprovecha los recursos informáticos recogidos en soporte digital, en la Web del Departamento y en la Web personal de los autores. Te facilitarán el estudio y la comprensión de los conocimientos tratados en esta unidad.

SOLUCIONES A LAS ACTIVIDADES PLANTEADAS EN LA UNIDAD.

A.1.1: No, un campo magnético sólo induce corriente eléctrica cuando varía en el tiempo su valor; si el campo magnético es constante en el tiempo no induce corriente.

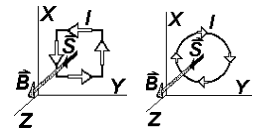
A.1.2: $\epsilon_{inducida} = I \cdot R = \frac{Q}{\Delta t} \cdot R = -\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t}$, con lo que: $Q = -\frac{\Delta\Phi_B}{R}$. La cantidad de carga transportada por el circuito es directamente proporcional a la variación del flujo del campo magnético, pero no al tiempo que dura esa variación, e inversamente proporcional a la resistencia del circuito al paso de la corriente. Si el flujo del campo magnético varía lentamente, entonces la intensidad de la corriente eléctrica es pequeña, y si lo hace muy deprisa, entonces, la intensidad de la corriente eléctrica es elevada.

A.1.3: Según avanza la espira hacia el interior del campo magnético, la superficie que delimita es atravesada por un flujo de campo magnético cada vez mayor, por lo que se genera una fem inducida y una corriente eléctrica inducida que se opone a la variación del flujo. Al cabo de 2,5 s (L/v) la espira se sitúa completamente dentro del campo magnético; a partir de este instante el flujo magnético a través de la espira no cambia, con lo que desaparece la fem inducida y la corriente inducida.



En un instante cualquiera entre 0 y 2,5 s, se cumple: $dS = L \cdot dl = L \cdot v \cdot dt$, y dado que los vectores \vec{B} y $d\vec{S}$ son paralelos: $d\Phi_B = \vec{B} \cdot d\vec{S} = B \cdot L \cdot v \cdot dt$, de donde: $\epsilon_{inducida} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -B \cdot L \cdot v = -2 \cdot 10^{-4}$ V. Aplicando la ley de Ohm:

$I = \frac{\epsilon}{R} = 2 \cdot 10^{-5}$ A, girando en sentido opuesto a las agujas del reloj (con el fin de generar en el interior de la espira un campo magnético inducido de sentido opuesto al campo magnético inductor).



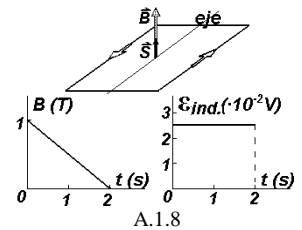
A.1.4: a) -4π V. b) 4π V. c) 8π V. d) 0 V. e) 4π V.

A.1.5: a) 0,750 V; b) 0,125 V; c) 0 V.

A.1.6: $1,6 \cdot 10^{-5}\pi (t + 4t^2)$ Wb; 0,062 V; $4,1 \cdot 10^{-3}$ A.

A.1.7: $1,25 \cdot 10^{-3}\pi$ Wb; $-2,5 \cdot 10^{-4}\pi$ V; 0 V.

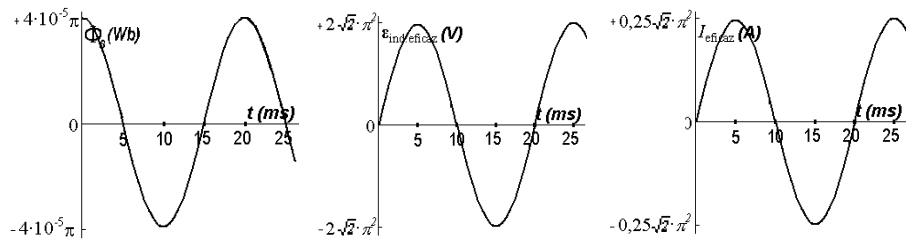
A.1.8: a) 0,025 V; b) Como el campo magnético varía linealmente con el tiempo, el valor de la fem inducida se mantiene constante durante los 2 s que hay variación de flujo magnético. c) $0,5 \cdot \sin(\omega t)$; $\pm 0,5$ V



A.2.1: $\Phi_B = 4 \cdot 10^{-5}\pi \cdot \cos(100\pi t)$ Wb ; $\epsilon_{ind,eficaz} = 2\sqrt{2} \cdot \pi^2 \cdot \sin(100\pi t)$ V; $I_{eficaz} = 0,25\sqrt{2} \cdot \pi^2 \cdot \sin(100\pi t)$ A.

Los valores máximos pueden observarse en las gráficas adjuntas y se dan cuando el plano de la espira es paralelo a la dirección del campo, o sea, \vec{B} y \vec{s} son perpendiculares.

Podemos conseguir una fem máxima eficaz de 220 V aumentando el número de espiras de la bobina, aumentando la intensidad del campo magnético o aumentando la frecuencia de giro del electroimán. En las condiciones dadas, la bobina debería llevar 7.881 espiras.



A.2.2: $70,71 \text{ s}^{-1}$; 11,25 Hz.

A.2.3: Trabajo personal de investigación en el que deberás hacer referencia a centrales convencionales (hidráulicas, térmicas –quemando combustibles, nucleares –por fisión) y otras de producción de energía eléctrica alternativas (eólica, solar fotovoltaica, mareomotriz, biomasa, ...). Resaltar las numerosas agresiones al medio ambiente derivadas de la utilización de la energía eléctrica, durante los procesos de su producción y transporte (alteraciones y contaminación del suelo, del agua y del aire).

A.2.4: Transforma energía eléctrica en energía mecánica, justo al contrario que un generador.

A.2.5: a) Un transformador es un dispositivo que permite modificar el voltaje de la corriente eléctrica alterna. Son útiles en el transporte de energía eléctrica, porque permiten reducir las pérdidas de energía debidas al efecto Joule. b) 220 V; 0,55 A.

A.2.6: a) Para disminuir la intensidad de corriente transportada y, con ello, las pérdidas de energía por efecto Joule. b) 18.182 espiras.

A.3.1: Lo que oscila en una onda electromagnética es el valor del campo eléctrico y del campo magnético asociados y perpendiculares entre sí, es decir, lo que experimenta vibraciones son las propiedades del mismo espacio. En el caso de que la onda se propague por un medio material puede oscilar también la materia pero por su interacción con la onda electromagnética.

A.3.2: Consiste en la integración de la Óptica como una parte del Electromagnetismo, a raíz de la teoría electromagnética de Maxwell y la comprobación de que la luz es una onda electromagnética más del amplio espectro electromagnético.

A.4. a) Como: $\lambda = c/v = 150$ m; $T = 1/v = 5 \cdot 10^{-7}$ s; ondas de radio. b) Como: $E = c \cdot B$, resulta: $B = 1,7 \cdot 10^{-6}$ T; el campo magnético vibra en la dirección del eje Z. c) $E(x, t) = 500 \cdot \sin[2\pi \cdot (2 \cdot 10^6 \cdot t - 6,7 \cdot 10^{-3} \cdot x)]$ N/C; $B(x, t) = 1,7 \cdot 10^{-6} \cdot \sin[2\pi \cdot (2 \cdot 10^6 \cdot t - 6,7 \cdot 10^{-3} \cdot x)]$ T.

A. Final. Trabajo personal.