

Capítulo 5. Campos Variables en el Tiempo

5.1 Campos Magnéticos Variables. Ley de Faraday-Lenz

En 1831, Miguel Faraday descubrió el fenómeno de *inducción magnética*, que consiste esencialmente en que un campo magnético *variable en el tiempo* puede inducir una FEM (o una corriente) en un circuito.

En la figura, al mover el imán delante de la bobina, se induce una corriente que puede ser detectada fácilmente con un amperímetro. Si el imán no se mueve, no aparece corriente alguna. Si en vez del imán se mueve la bobina, también aparece una corriente. Los diferentes resultados experimentales que se obtienen cuando se utilizan diferentes configuraciones y formas de variar el campo magnético se pueden resumir en una expresión general única.

Esa expresión es la *ley de Faraday*:

$$\varepsilon_{\text{ind}} = - \frac{d\phi}{dt}$$

ϕ es el *flujo magnético* a través de la superficie encerrada por el circuito:

$$\phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{s}$$

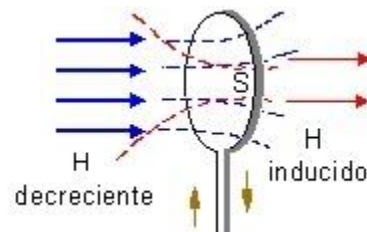
Unidades. En el SI de unidades, $[\phi] = [B][A] = \text{Tm}^2 = \text{Weber}$ (Wb)

Ley de Lenz

El signo (-) que aparece en la ley de Faraday no es estrictamente una parte cuantitativa de la ley, sino mas bien una forma convencional de recordar la *ley de Lenz*, que establece que la FEM (o la corriente) inducida tiene un sentido tal que *siempre se opone a la causa que la produce*. Usualmente se toma el valor modular de $d\phi/dt$, y el sentido de la FEM se establece con el auxilio de la ley de Lenz.

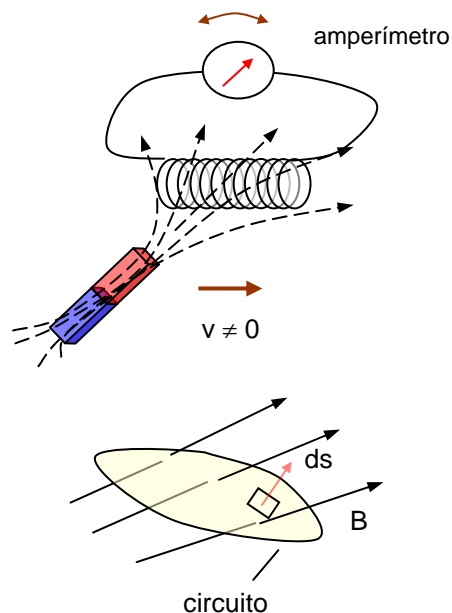
Para esclarecer el significado de la ley de Lenz analicemos el siguiente ejemplo.

En la figura, la espira es perpendicular a la dirección de H , por tanto se puede omitir la notación vectorial ($\theta = 0$, $\cos\theta = 1$) y $\phi = \mu_0 \int H ds$. Si H comienza a disminuir de valor, ϕ también decrecerá; $d\phi/dt$ no será nula, y según la ley de Faraday aparecerá una FEM inducida $\varepsilon = - d\phi/dt$. Si la espira tiene una resistencia R distribuida en toda su longitud, la corriente inducida será $i = \varepsilon/R$.



Según la ley de Lenz, el sentido de la corriente inducida debe ser tal que se oponga a la causa que la produjo. ¿Cual fue esa causa? Pues *la disminución de H*. Para oponerse a la disminución de H , la corriente inducida debe generar un campo magnético H_{ind} que *se suma a H* para evitar su disminución.

En el epígrafe 4.3 vimos que un alambre con corriente siempre tiene asociado un campo magnético, y que el sentido del campo es tal que cumple la regla de la mano derecha. Por tanto, analizando las dos posibles direcciones de la corriente en la espira, se llega rápidamente a la conclusión de que la dirección correcta es la que aparece en la figura, pues en este caso el campo inducido tiende a *reforzar* el campo decreciente, oponiéndose así a su disminución. Se deja al lector el análisis de una situación similar, pero ahora con un campo H creciente y de sentido contrario.



Generación de una FEM Alterna Sinusoidal

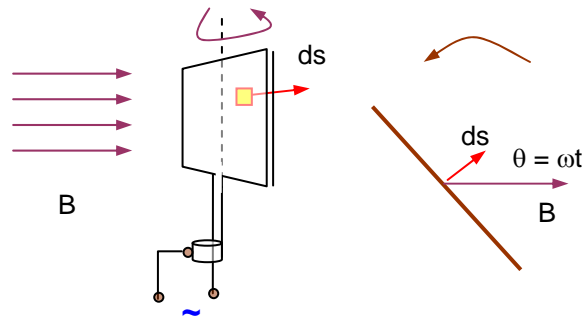
Es posible generar una FEM alterna de la forma siguiente. En la figura, la inducción magnética B es constante y uniforme, y la espira se encuentra rotando alrededor de un eje vertical con velocidad angular ω . En la parte inferior se representan esquemáticamente las conexiones que permiten a la espira rotar a la vez que mantiene un contacto eléctrico continuo con otros circuitos. A la derecha se muestra la espira vista desde la parte superior, rotando hacia la izquierda.

El flujo que atraviesa la espira en un instante determinado será:

$$\phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{s} = \int B \cos \theta ds = \int B \cos(\omega t) ds .$$

Como B es uniforme y constante, tomará el mismo valor en todos los puntos de la superficie de la espira, y se puede sacar fuera de la integral. Lo mismo sucede con el factor $\cos(\omega t)$, que no depende del área. La integral restante toma el valor del área S de la espira. Por tanto:

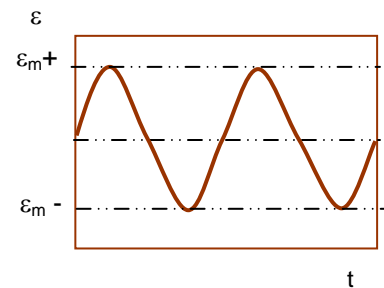
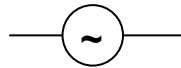
$$\phi = BS \cos \omega t$$



Aplicando la ley de Faraday, $\varepsilon = - d\phi/dt$ y llamando $\varepsilon_m = BS\omega$ se llega inmediatamente a:

$$\varepsilon = \varepsilon_m \sin(\omega t)$$

Si analizamos el gráfico de ε vs. t a la derecha, se ve inmediatamente que la polaridad de los bornes cambia continuamente con el transcurso del tiempo, con una dependencia sinusoidal y frecuencia dada por $f = \omega/2\pi$. Una FEM alterna se representa usualmente por el símbolo siguiente:



Ejemplo. En la figura, B es uniforme y varía con el tiempo según la expresión en Tesla: $B = B_0 - 5t$. Si el área encerrada por la espira es de 10 cm^2 : a) ¿Cuál es el valor de la FEM inducida en la espira? b) ¿Cuál es el sentido de la corriente que se induce?

a) $\phi = \int B \cos \theta ds$

Como B y ds son paralelos, $|\cos \theta| = 1$. Sustituyendo B :

$$\phi = \int (B_0 - 5t) ds = B_0 A - 5At$$

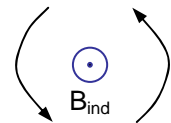
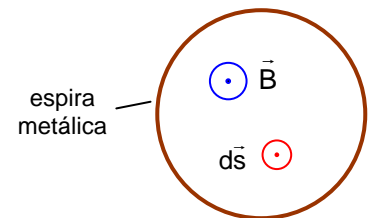
Tomando valor modular:

$$\varepsilon_{\text{ind}} = d\phi/dt = 5A$$

$$A = 10 \text{ cm}^2 = 10 \cdot (10^{-2})^2 \text{ m}^2 = 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\varepsilon_{\text{ind}} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ V}$$

b) Si B está disminuyendo su valor, el sentido de B_{ind} debe ser tal que tienda a reforzar el de B , es decir, saliendo del plano del papel. Por tanto, el sentido de recorrido de la corriente será contrario al de las agujas del reloj.



5.2 Coeficiente de Inducción Mutua

En la figura, la corriente i_1 varía con el tiempo y origina una inducción B_1 , que es proporcional a i_1 (recordar que para un solenoide $B = \mu_0 ni$; es decir, $B \propto i$). También la expresión para un alambre con corriente es similar). El flujo que pasa por la espira 2 viene dado por

$$\phi_2 = \int_{S_2} \vec{B}_1 \cdot d\vec{s}_2$$

y también será proporcional a i_1 . Llamando M a la constante de proporcionalidad, es posible escribir entonces,

$$\phi_{21} = Mi_1$$

donde ϕ_{21} representa el flujo en la espira (2) originado por la corriente en la espira (1). El coeficiente M se denomina *coeficiente de inducción mutua* entre las espiras.

Si la corriente i_1 está variando en el tiempo, $i = i(t)$, y por tanto $\phi_{21} = \phi_{21}(t)$. De acuerdo a la ley de Faraday, en la espira (2) tendremos, en valor modular:

$$\varepsilon_2 = \frac{d\phi_{21}}{dt} = M \frac{di_1}{dt}$$

Si se invierte la situación, haciendo pasar una corriente por la espira (2) y analizando el valor de la FEM en la espira (1), se obtiene un resultado totalmente análogo, con la particularidad de que el coeficiente M es el mismo en ambos casos. Es decir,

$$\frac{\phi_{21}}{i_1} = \frac{\phi_{12}}{i_2} = M$$

M depende solamente de la geometría de los dos circuitos, pero es una propiedad del sistema formado por ambas espiras.

Unidades: $[M] = \frac{[\phi]}{[i]} = \frac{\text{Wb}}{\text{A}} = \text{henry (H)}$

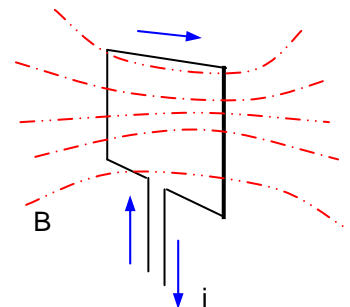
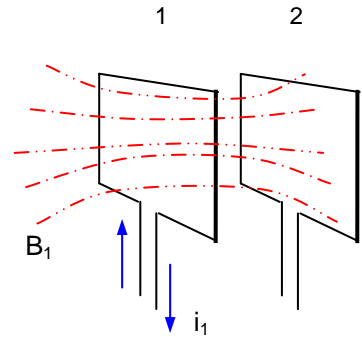
5.3 Coeficiente de Autoinducción

Considere una espira por la que circula una corriente variable en el tiempo. La corriente genera un campo $B(t)$ también variable, quien a su vez genera un flujo $\phi(t)$ en la espira. Pero según la ley de Faraday, ese flujo, creado por la propia espira, debe dar origen a una FEM *en la propia espira*:

$$\varepsilon_{\text{ind}} = - \frac{d\phi}{dt}$$

Esa FEM debe cumplir la ley de Lenz, oponiéndose a la causa que la produce (la variación de la corriente). El fenómeno se denomina *autoinducción*. Por analogía con el coeficiente de inducción mutua, el coeficiente $L = \phi/i$ se denomina coeficiente de autoinducción. Depende solo de la geometría de la espira (o del circuito) en cuestión. Sustituyendo en la expresión anterior se obtiene, en función del coeficiente de autoinducción,

$$\varepsilon_{\text{ind}} = -L \frac{di}{dt}$$



Cálculo de L para un solenoide

Considere un solenoide de N vueltas, sección transversal de área A y longitud l por el que circula una corriente. La inducción $B = \mu_0 ni$ atraviesa el área encerrada por las N espiras. Si ϕ_0 es el flujo que atraviesa el área de una de las espiras, de acuerdo a la definición de L tendremos:

$$L = \frac{N\phi_0}{i}$$

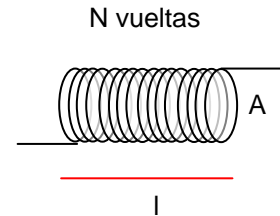
$$\phi_0 = \int B \cos \theta ds = \mu_0 ni \int ds = \mu_0 niA$$

y sustituyendo en la expresión de L:

$$L = \frac{N\mu_0 niA}{i}$$

Finalmente, sustituyendo $n = N/l$ se llega a:

$$L = \frac{\mu_0 N^2 A}{l}$$

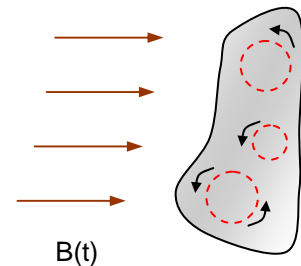


$$(5.3.1)$$

Note que L depende sólo de la geometría del solenoide, y no de parámetros eléctricos o magnéticos.

5.4 Corrientes de Foucault

Supongamos que, en vez de actuar sobre un circuito, un campo magnético variable en el tiempo actúa directamente sobre una lámina metálica. Se encuentra en la práctica que en el seno del metal aparecen corrientes inducidas que causan el calentamiento del conductor. Esas corrientes se denominan *corrientes de Foucault*. Note que para generar una corriente es necesario gastar energía. Significa que el campo magnético variable es capaz de transmitir energía al seno del metal.



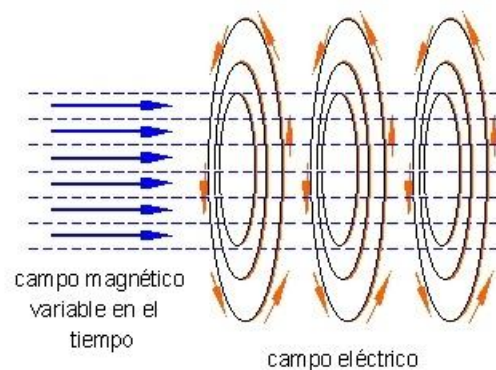
A nivel microscópico la ley de Ohm toma la forma $\vec{j} = \sigma \vec{E}$.

Por tanto, si existe una corriente en el seno del metal, también debe existir el correspondiente campo eléctrico de intensidad E. Pero como la corriente se originó a causa de un campo magnético variable, es posible concluir que

el campo magnético variable genera un campo eléctrico, también variable.

Es posible comprobar que la generación de campos eléctricos mediante campos magnéticos variables tiene lugar en cualquier otro material e incluso en el vacío (ver figura).

Las líneas de fuerza de la intensidad de campo \vec{E} son, en este caso, *cerradas* y perpendiculares a las líneas de inducción magnética. A diferencia de lo que ocurre en el caso electrostático, el campo eléctrico así generado *no* es un campo conservativo; el trabajo realizado por la fuerza eléctrica $F = qE$ sobre una partícula cargada en una trayectoria cerrada no se anula.



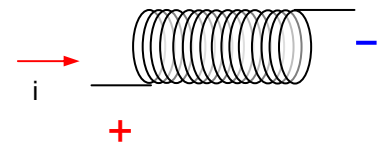
5.5 Energía del Campo Magnético

Energía Almacenada en una Bobina

Considere el solenoide de la figura, y un intervalo de tiempo durante el cual la corriente incrementa su valor continuamente. La resistencia de los alambres que conforman el solenoide es despreciable. La FEM inducida por la corriente variable toma el valor

$$\varepsilon_{\text{ind}} = -L \frac{di}{dt}$$

y su sentido es el de la figura, oponiéndose a la causa que la origina (el incremento de la corriente).



Se desea calcular la energía que hay que gastar para llevar la corriente desde un valor i_0 hasta otro $i > i_0$, trabajando en contra de la FEM inducida. El valor de la FEM inducida es igual a la diferencia de potencial V_{ab} en los extremos de la bobina. Y como el potencial no es más que la energía potencial por unidad de carga, es posible escribir

$$\varepsilon_{\text{ind}} = V_{ab} = \Delta E_p/q$$

Considerando una porción infinitesimal de carga dq trasladada desde a hasta b, la correspondiente variación infinitesimal de energía dE_p vendrá dada por:

$$dE_p = \varepsilon_{\text{ind}} dq = L \frac{di}{dt} idt = Lidi$$

donde el signo (-) se ha omitido por estar ya considerado en la ley de Lenz. Integrando a ambos lados de la expresión, tomando $i_0 = 0$:

$$\int_0^E dE_p = L \int_0^i idi$$

$$E_L = \frac{1}{2} Li^2$$

(5.5.1)

El subíndice p se ha sustituido por L para indicar que esta es la energía que hay que gastar para establecer una corriente i en la bobina de autoinducción L .

La energía gastada se emplea en crear el campo magnético, y no se disipa mientras éste exista. Al desconectar la corriente, se revierte al circuito o se disipa bruscamente en forma de chispa.

Densidad de Energía del Campo Magnético

Si en (5.5.1) se sustituye la corriente en función de la expresión de la inducción en la bobina, $B = \mu_0 ni$ y el valor del coeficiente de autoinducción (5.3.1) se obtiene

$$E_L = \frac{1}{2} \frac{\mu_0 N^2 A}{l} \frac{B^2}{\mu_0^2 n^2}$$

Sustituyendo $n = N/A$, simplificando y agrupando, llamando $V = Al$, se llega a:

$$E_L = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} V$$

Dividiendo por el volumen V del solenoide se llega a la energía por unidad de volumen o *densidad de energía* en la bobina:

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0}$$

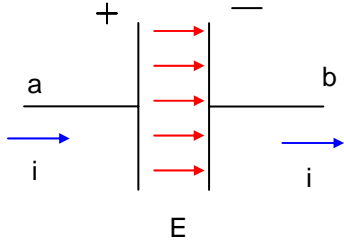
Note que esta energía depende solamente de la inducción magnética, y no depende de ningún parámetro de la bobina. De aquí que esta energía se pueda asociar directamente al campo magnético, independientemente de su origen. Esta expresión nos dice también que es necesario gastar energía para crear un campo magnético, y esa energía deber ser retirada, o pasada a otro sistema, para lograr que el campo desaparezca.

5.6 Corriente de Desplazamiento y Campo Electromagnético

En la sección 5.4 se analizó como un campo magnético variable es capaz de generar un campo eléctrico, cuyas líneas de fuerza son perpendiculares a la dirección de la inducción magnética. En lo que sigue se analiza el efecto contrario: el hecho de que un campo eléctrico variable es capaz de generar un campo magnético.

Considere un condensador sometido a una diferencia variable de potencial. Como la diferencia de potencial varía, habrá un flujo de cargas hacia o desde el condensador, y por tanto $i = dq/dt \neq 0$. Si d_0 es la separación entre las placas, entonces, en un instante determinado,

$$V_{ab} = E d_0 \tag{5.6.1}$$



Para el condensador, $C = q/V_{ab}$. Despejando y derivando con respecto al tiempo en esta expresión:

$$\frac{dq}{dt} = C \frac{dV_{ab}}{dt}$$

Sustituyendo (5.6.1) y la capacidad del condensador plano $C = \varepsilon_0 A/d$, simplificando y agrupando términos con $dq/dt = i_D$, se obtiene:

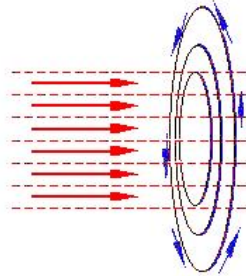
$$i_D = \varepsilon_0 A \frac{dE}{dt}$$

El parámetro i_D representa la corriente dentro del condensador (donde no hay conductor) y se denomina *corriente de desplazamiento*. Significa que hay una cierta corriente asociada a la *variación* de E dentro del condensador. Si no hay variación $dE/dt = 0$, y por el condensador no circula corriente.

La corriente de desplazamiento de alguna forma justifica el hecho de que hay corriente donde no debiera haberla, ya que el condensador representa un circuito abierto, por el cual no debería circular corriente. Por otra parte, es conocido que la corriente en el alambre tiene un campo magnético asociado dado aproximadamente por $B = \mu_0 i / 2\pi r$. Por tanto, la corriente de desplazamiento dentro del condensador también debería tener un campo magnético asociado.

En la práctica se encuentra que, efectivamente,

el campo eléctrico variable en el tiempo tiene asociado un campo magnético, también variable, cuyas líneas de fuerza son cerradas y perpendiculares a la dirección del campo eléctrico.

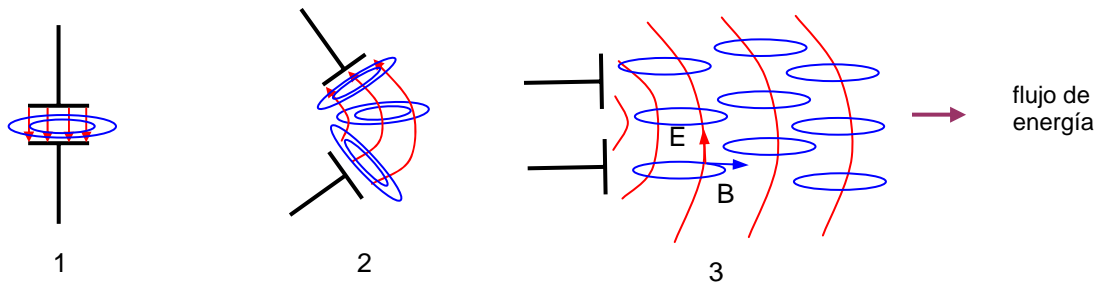


En la sección 5.4 se analizó como un campo magnético variable tiene asociado un campo eléctrico también variable. Y acabamos de analizar que un campo eléctrico variable también tiene asociado un campo magnético.

Significa que los campos eléctricos y magnéticos variables siempre tienen asociados un campo de la otra especie, de aquí que se común hablar del *campo electromagnético*: la presencia de uno trae invariablemente aparejada la presencia del otro.

5.7 Ondas Electromagnéticas

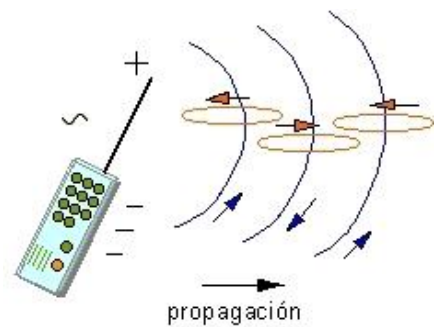
En la figura se muestra en forma esquemática como un condensador sometido a una FEM alterna puede ser convertido en un dipolo radiador de energía electromagnética en tres etapas. Se supone que la FEM aplicada al condensador varía con el tiempo según una dependencia sinusoidal del tipo $\varepsilon = \varepsilon_m \sin \omega t$.



Cualquier dispositivo similar que sirva para radiar energía al medio ambiente se denomina usualmente dipolo radiante u oscilante, aunque más comúnmente se denomina *antena emisora*.

Quizás las antenas emisoras más familiares en el presente son las de los teléfonos celulares. Estos dispositivos emiten radiación electromagnética a frecuencias bastante altas, del orden de megahertz (la FEM que genera la señal varía continuamente de sentido varios millones de veces por segundo).

La fuente de energía es una batería química convencional. La transformación del sonido en una señal electromagnética se lleva a cabo utilizando circuitos electrónicos de gran complejidad.



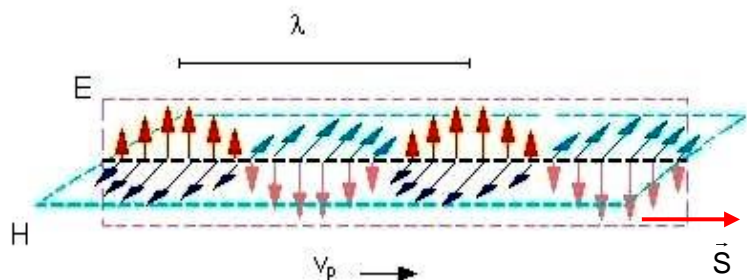
Cuando se hace un estudio detallado del fenómeno, se encuentra que el flujo de energía radiado por la antena posee propiedades ondulatorias, y que la radiación electromagnética radiada por la antena se comporta como una onda, donde oscilan los campos eléctricos y magnético. La onda electromagnética es capaz de autosostenerse. Existe y se propaga independiente de la fuente que le dio origen. El campo eléctrico variable es capaz de engendrar otro magnético, también variable, que a su vez engendra otro eléctrico, y así sucesivamente.

En la figura adjunta se muestra un esquema de la *onda electromagnética*, tal como se vería en un instante determinado. Las principales propiedades de la onda electromagnética son las siguientes:

- Las intensidades de los campos eléctrico y magnético varían en el tiempo de acuerdo a la ecuación de una onda:

$$E = E_m \sin(kx - \omega t)$$

$$H = H_m \sin(kx - \omega t)$$



- La onda que aparece en el esquema está *polarizada* en un plano. Significa que el vector E (y el H) siempre oscilan en un mismo plano. En el caso más común el vector E puede estar, en un instante dado, apuntando en cualquier dirección del espacio perpendicular a la dirección de propagación (onda no polarizada).
- Es posible demostrar, a partir de las leyes del electromagnetismo, que la velocidad de propagación $v = \lambda f$ en el vacío se relaciona con los parámetros del electromagnetismo por la relación

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \approx 300\,000 \text{ km/s (velocidad de la luz)}$$

- E y H siempre son perpendiculares entre sí y a la dirección de propagación.
- E y H siempre están en fase (alcanzan los máximos y los mínimos conjuntamente).
- La energía por unidad de volumen almacenada en la onda electromagnética se expresa como

$$\epsilon = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2} \mu_0 H^2 .$$

Cuando se calcula la energía por unidad de tiempo que atraviesa una sección transversal perpendicular a la dirección de propagación se obtiene el *vector de Poynting* \vec{S} , donde E y H representan las amplitudes (valores máximos) del campo:

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$$

Por otra parte, H y E no son independientes; están relacionados por las leyes del electromagnetismo. Se puede comprobar que, en el vacío, $H = (\epsilon_0/\mu_0)^{1/2} E$. De aquí sigue inmediatamente que

$$S = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} E^2$$

Una expresión similar se obtiene cuando el medio de propagación no es el vacío, aunque los valores de las constantes bajo el radical no son los mismos.

Para mantener una notación similar a la utilizada en la mayoría de los textos de óptica, en lo que sigue llamaremos *intensidad de la radiación* al modulo del vector de Poynting (energía por unidad de área por unidad de tiempo: $I = \epsilon/At$). Por tanto, de acuerdo al resultado de Poynting, la intensidad es proporcional al cuadrado de la amplitud del campo eléctrico, lo que se denota usualmente como:

$$I \propto E^2$$

5.8 Espectro Electromagnético

Se le llama *espectro electromagnético* al conjunto de todas las posibles frecuencias con que puede presentarse una onda electromagnética. El espectro electromagnético abarca una región muy amplia, desde unos pocos cientos de Hz hasta miles de millones de Hz.

Las propiedades de la radiación electromagnética varían notablemente en dependencia de su frecuencia; las radiaciones de más baja frecuencia constituyen las conocidas ondas de radio, las de más alta frecuencia corresponden a la radiación gamma penetrante (de la letra griega gamma γ), que se obtiene como producto de las reacciones nucleares. Dentro de ese intervalo se encuentran todas las demás radiaciones; onda corta, radiación infrarroja (IR), espectro visible, ultravioleta (UV) y rayos X. Las características de la radiación de frecuencia superior a la de microondas se estudian en los cursos de óptica y física atómica.

El descubrimiento de las ondas de radio a finales del siglo XIX trajo aparejado un impetuoso desarrollo de los medios de comunicación, incluyendo la televisión, las transmisiones por satélite y la telefonía celular, con infinidad de aplicaciones en otras ciencias como la meteorología y la astronomía. La denominada *onda media* de los receptores de radio en amplitud modulada (AM) cubre el intervalo 550 – 1250 kHz. Las frecuencias mayores corresponden a las *ondas cortas* de diferentes bandas: 19 m, 25 m, etc.

Espectro electromagnético		
f(Hz)	$\lambda(m)$	Denominación
$10^2 - 10^{10}$	$10^6 - 10^{-1}$	Ondas de radio
$10^{10} - 10^{12}$	$10^{-1} - 10^{-3}$	Microondas (radar)
$10^{12} - 10^{14}$	$10^{-3} - 10^{-6}$	Infrarrojo
$10^{14} - 10^{15}$	$10^{-6} - 10^{-7}$	Visible
$10^{15} - 10^{16}$	$10^{-7} - 10^{-8}$	Ultravioleta
$10^{17} - 10^{20}$	$10^{-9} - 10^{-11}$	Rayos X
$> 10^{20}$	$< 10^{-11}$	Rayos γ

Guglielmo Marconi, (1874-1937), ingeniero italiano, conocido como el inventor del primer sistema práctico de señales de radio. Ya en 1890 se interesaba por la telegrafía sin hilos y hacia 1895 había inventado un aparato con el que consiguió enviar señales a varios kilómetros de distancia mediante una antena direccional.

Formó en Londres la Compañía de Telegrafía sin Hilos Marconi (1897), y en 1899 estableció la comunicación a través del canal de la Mancha entre Inglaterra y Francia. Las marinas italiana y británica pronto adoptaron su sistema y hacia 1907 había alcanzado tal perfeccionamiento que se estableció un servicio trasatlántico de telegrafía sin hilos para uso público. En 1909 Marconi recibió el Premio Nóbel de Física por su trabajo.

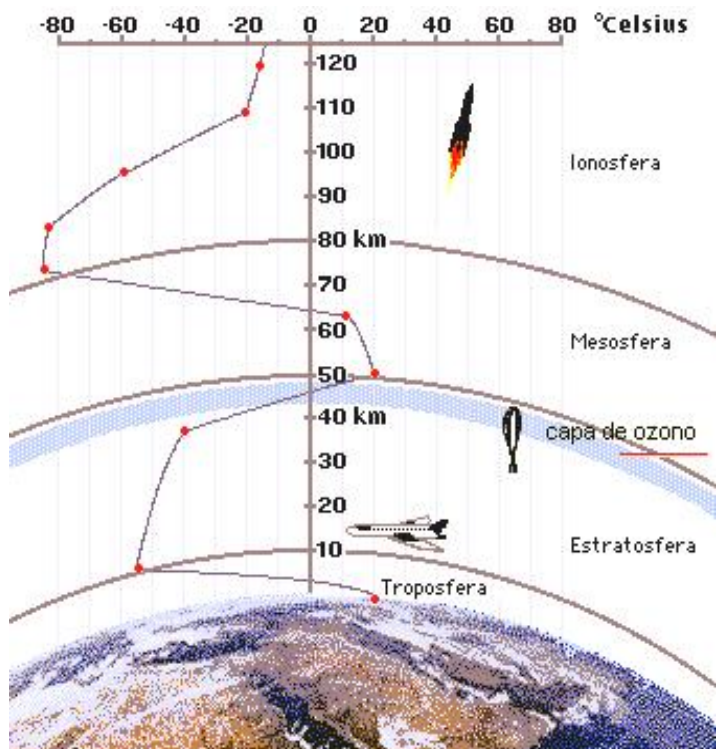


Durante la I Guerra Mundial estuvo encargado del servicio telegráfico italiano e inventó la transmisión de onda corta como medio de comunicación secreta.

Reflexión de las Ondas de Radio en la Ionosfera

Se denomina *ionosfera* a un conjunto de capas de aire ionizado en la atmósfera que se extienden desde una altura de casi 80 km sobre la superficie terrestre hasta 640 km o más. (En comparación, la altura de las líneas aéreas comerciales es de unos 10 km). A estas alturas el aire está enrarecido en extremo, como si se hubiera hecho vacío con una bomba mecánica.

Cuando las partículas gaseosas de la atmósfera se ionizan a causa de la radiación ultravioleta del sol, tienden a permanecer ionizadas debido a las mínimas colisiones que se producen entre los iones. Estas partículas son capaces de reflejar parcialmente las ondas de radio. De ahí que una parte de la energía radiada por un transmisor hacia la ionosfera sea absorbida por el aire ionizado y otra sea parcialmente reflejada hacia la superficie de la Tierra. Este último efecto permite la recepción de señales de radio a distancias mucho mayores de lo que sería posible con ondas que viajaran solamente por la superficie terrestre.



Sin embargo, las ondas reflejadas alcanzan el suelo sólo a determinadas distancias definidas del transmisor. La distancia depende del ángulo de reflexión y de la altura. Así, una señal de radio puede no ser detectable a 100 km de la fuente, pero sí a 500 km. Este fenómeno se conoce como *skip*. En otras regiones, las señales terrestres y las refractadas por la ionosfera pueden alcanzar el receptor conjuntamente e interferir una con otra, produciendo un fenómeno llamado *fading*.

La reflexión en la ionosfera decrece con el incremento de la frecuencia; si la frecuencia es suficientemente alta el fenómeno desaparece y la radiación atraviesa la ionosfera libremente. Por lo tanto, la transmisión a larga distancia de ondas de radio de alta frecuencia se limita a la línea del horizonte. Este es el caso de la televisión y de la radio de frecuencia modulada (FM). Para hacer transmisiones a larga distancia es necesario utilizar satélites de comunicaciones como puntos intermedios de retransmisión. Como la ionización de las capas y su altura sobre la superficie se ve influenciada por la actividad solar, las características de reflexión usualmente difieren apreciablemente del día a la noche.

Radar. El radar es un instrumento muy utilizado en el control de tráfico aéreo y en la meteorología. Los sistemas de radar (del inglés RAdio Detection And Ranging) utilizan un transmisor-receptor de radio de alta frecuencia que emite radiaciones con λ comprendida entre algunos centímetros y 1 m (ondas métricas y centimétricas). La radiación en este rango de frecuencias tiene la particularidad de que los objetos que se hallan en la trayectoria del haz reflejan las ondas hacia el transmisor, que es capaz de detectar las ondas reflejadas.

Midiendo el retardo de la señal por medios electrónicos es posible conocer la distancia hasta el objeto en cuestión, ya que la velocidad de propagación es conocida.

El *radar meteorológico* es capaz de detectar las ondas reflejadas por la lluvia que usualmente acompaña a fenómenos meteorológicos severos como huracanes, tornados y otras tormentas. Puede alcanzar distancias de varios miles de kilómetros. Se utiliza tanto para detectar estos fenómenos como para determinar su localización con exactitud.

Los hornos de microondas funcionan a frecuencias cercanas a los 2450 MHz, excitando el momento dipolo eléctrico de las moléculas del agua contenida en los alimentos. Estas moléculas, al aumentar su movimiento, producen calor y hacen que aumente la temperatura. Las microondas no pueden penetrar en un recipiente de metal para calentar la comida, pues los metales reflejan las ondas de radio, pero sí pueden atravesar los recipientes no metálicos y ser absorbidas por los alimentos en su interior. Los alimentos se cocinan desde dentro, a diferencia de un horno convencional en el que se calientan desde fuera, por lo que tardan menos en hornearse y se gasta menos energía.

5.9 Efectos Biológicos de la Radiación

Desde el punto de vista de la interacción con las sustancias biológicas, las radiaciones electromagnéticas pueden dividirse en radiaciones *ionizantes* y *no ionizantes*.

A frecuencias muy altas, correspondiente al ultravioleta lejano, los rayos X y los rayos γ , la radiación tiene energía suficiente para romper los enlaces químicos e *ionizar* los átomos. La correspondiente radiación se denomina *ionizante*. A frecuencias más bajas como las de la luz visible, microondas y radio, la energía no es suficiente para romper enlaces químicos; la radiación es *no ionizante*.

La exposición a las microondas es peligrosa cuando se producen densidades elevadas de radiación; la exposición a radiaciones de alta intensidad puede provocar quemaduras, cataratas, daños en el sistema nervioso y esterilidad. Aún no se conocen bien los posibles peligros de la exposición prolongada a las microondas con bajo nivel de intensidad.

Tipo de radiación	Características
Ionizante	Ioniza o rompe las moléculas (UV lejano, rayos X y γ). Daña en gran intensidad.
No ionizante (óptica)	Excita los electrones e induce reacciones químicas (UV cercano, visible e IR).
No ionizante (radio AF)	Induce corrientes e interacciona con los dipolos eléctricos produciendo el calentamiento de los tejidos (microondas y radio AF)
No ionizante (radio BF)	Prácticamente no produce calentamiento (campos de frecuencia industrial y radio por debajo de 1 MHz)

La capacidad de penetración de la radiación en los organismos vivos tampoco es la misma para las diferentes frecuencias. Las ondas de radio y los rayos X son capaces de atravesar fácilmente las sustancias biológicas, mientras que la radiación visible y ultravioleta es absorbida completamente en la superficie.

La **diatermia** por radiación se utiliza ampliamente para tratar el dolor y la inflamación en los tejidos, irradiando la zona afectada con radiofrecuencias para producir calor. La frecuencia utilizada en los equipos comerciales es cercana a los 2 GHz.

Como el campo eléctrico actúa directamente sobre las cargas, la componente eléctrica del campo electromagnético es capaz de generar pequeñas corrientes eléctricas en los tejidos. Estas corrientes son proporcionales tanto a la intensidad del campo como a la rapidez de su variación en el tiempo.

El calor puede originarse por diversos mecanismos, a partir de la inducción de corrientes alternas o por interacción con el dipolo eléctrico de las moléculas del agua contenida en los tejidos, en forma similar a lo que ocurre en un horno de microondas.