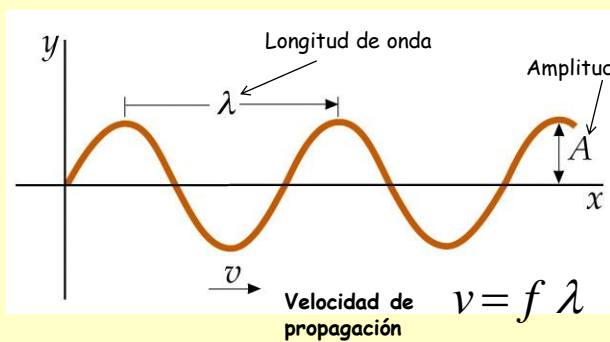


BLOQUE 1. ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO

Tema 2. Ondas electromagnéticas

1. Generalidades sobre ondas
2. Ondas electromagnéticas
3. Energía y momento de una onda
4. Propagación de oem
5. El espectro electromagnético

Ondas periódicas armónicas



Número de onda

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Frecuencia angular

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$\omega = 2\pi f$$

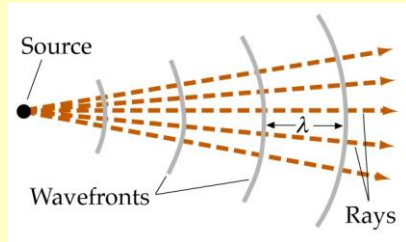
Ecuación de onda

$$y(x, t) = A \sin(kx - \omega t)$$

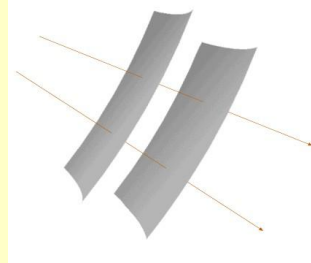
Fase

Ondas en tres dimensiones

Frentes de onda y rayos



Ondas planas



Intensidad

$$I = \frac{P_m}{A}$$

Intensidad debida a un foco puntual

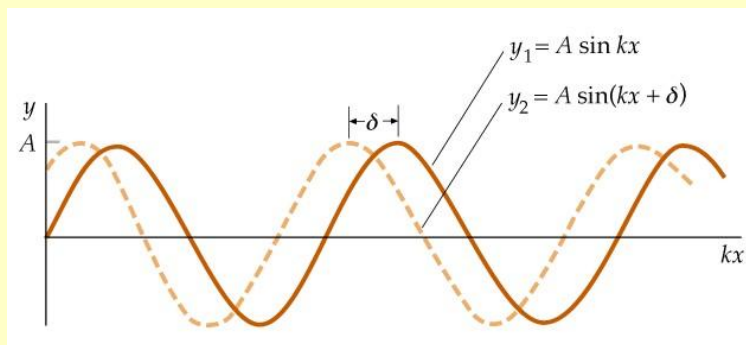
$$I = \frac{P_m}{4\pi r^2}$$

Ondas y barreras

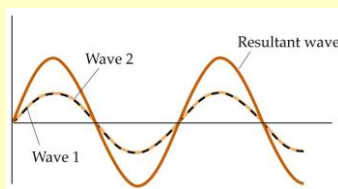
- Reflexión
- Refracción
- Difracción

Superposición de ondas

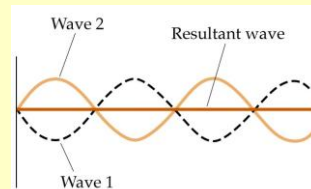
Cuando dos o más ondas se combinan, la onda resultante es la suma algebraica de las ondas individuales



INTERFERENCIA:
superposición de
ondas con igual o
parecida frecuencia

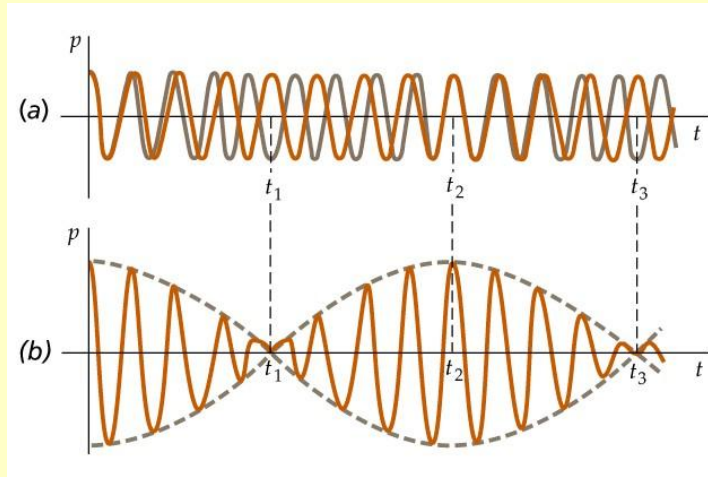


Interferencia constructiva



Interferencia destructiva

PULSACIONES o BATIDOS: superposición de ondas de frecuencias ligeramente diferentes



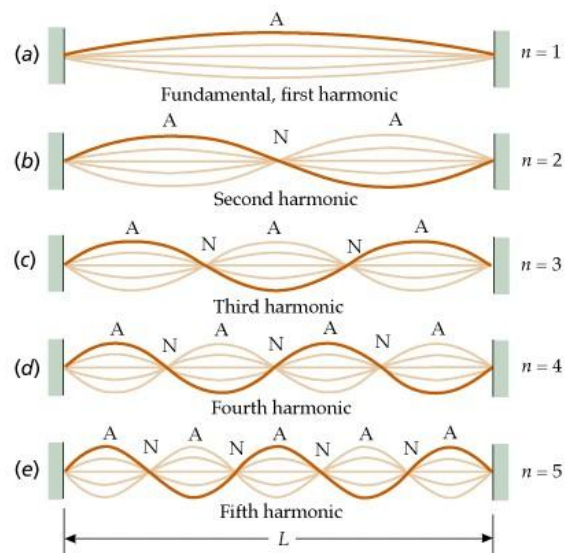
Ondas estacionarias

Ondas confinadas en el espacio

$$L = n \frac{\lambda_n}{2}$$

Condición de onda estacionaria

Cuerda fija por ambos extremos



ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Fuerza de Lorentz

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Ecuaciones de Maxwell

Ley de Gauss: Relaciona el campo eléctrico con las cargas que lo crean



$$\phi_E = \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0}$$

Ley de Gauss del magnetismo: Las líneas de campo magnético son cerradas



$$\phi_B = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

Ley de Ampère-Maxwell: Una corriente o un campo eléctrico variable crean un campo magnético

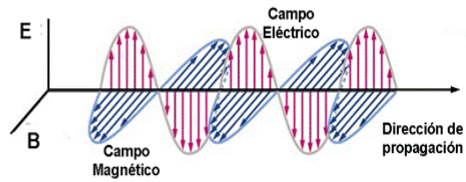


$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \left(I + \epsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt} \right)$$

Ley de Faraday: Un campo magnético variable crea un campo eléctrico

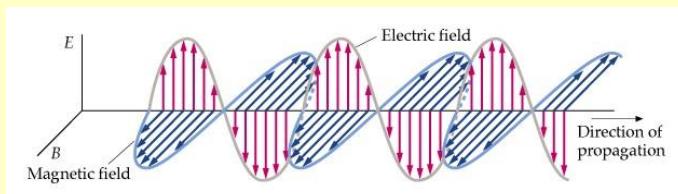


$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$



Generalidades sobre Ondas Electromagnéticas

- Se producen cuando se aceleran cargas o cuando los electrones ligados a átomos o moléculas verifican transiciones a estados de menor energía.
- Las soluciones de las **leyes de Ampère-Maxwell y de Faraday**, son dos funciones E y B que varían armónicamente y satisfacen la misma ecuación de onda.
- E y B representan los **campos eléctrico y magnético** que se propagan en el espacio según dos ondas que **oscilan en fase** perpendicularmente entre sí y a la dirección de propagación.
- La velocidad de propagación en el vacío, **c**, es coincidente con la **velocidad de la luz** en el vacío.
- En el vacío y en cualquier instante, el cociente entre el campo eléctrico y el campo magnético es igual a c.
- Las ondas electromagnéticas obedecen al principio de superposición y tienen propiedades de interferencia, reflexión, refracción y polarización.
- Las ondas electromagnéticas **transportan cantidad de movimiento y energía**, y pueden transferirla a objetos que se encuentren en su trayectoria, dando lugar a la **presión de radiación**.



$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad E = cB$$

$$\vec{S} = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{\mu_0} \quad \text{Vector de Poynting}$$

Ley de Ampère-Maxwell en el vacío

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

Ley de Faraday en el vacío

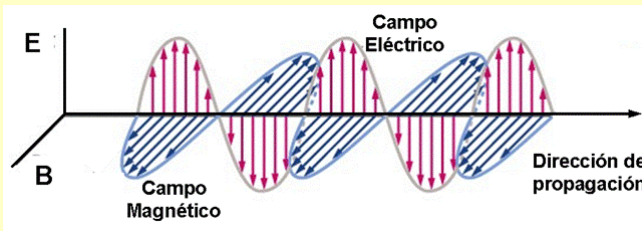
$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 B_z}{\partial x^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 B_z}{\partial t^2}$$

$$\begin{cases} \vec{B} = \vec{B}(x, y, z, t) \\ \vec{E} = \vec{E}(x, y, z, t) \end{cases}$$

Soluciones armónicas a las ecuaciones de onda



$$E_y = E_0 \sin(kx - \omega t)$$

$$B_z = B_0 \sin(kx - \omega t)$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad E_0 = c B_0$$

Intensidad

Densidad de energía asociada a la onda electromagnética

$$c^2 = \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}$$

$$E = c B$$

$$\eta_M = \frac{B^2}{2\mu_0} = \frac{(E/c)^2}{2\mu_0} = \frac{E^2}{2\mu_0 c^2} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 = \eta_E$$

$$\eta = \eta_E + \eta_M = \epsilon_0 E^2 = \frac{B^2}{\mu_0} = \frac{E B}{\mu_0 c}$$

Intensidad

$$I = \frac{P_m}{A} = c \bar{\eta} = \frac{E_0 B_0}{2\mu_0}$$

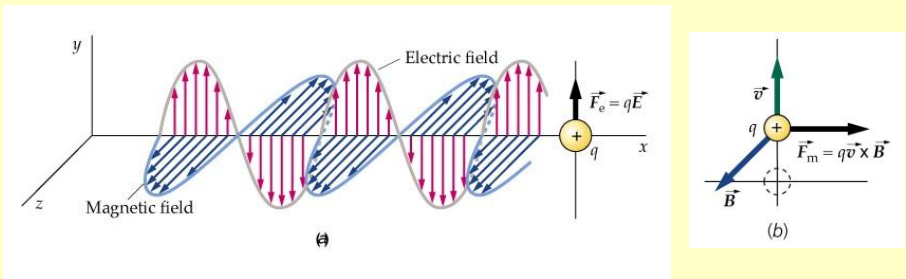
Vector de Poynting

$$\vec{S} = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{\mu_0} \longrightarrow S = \frac{E B}{\mu_0} = \frac{E^2}{\mu_0 c} = \frac{c B^2}{\mu_0}$$

La intensidad es equivalente al valor medio del vector de Poynting y representa una potencia por unidad de área (Wm^{-2})

$$I = \bar{S} = \frac{E_0 B_0}{2\mu_0}$$

Energía y momento de una OEM



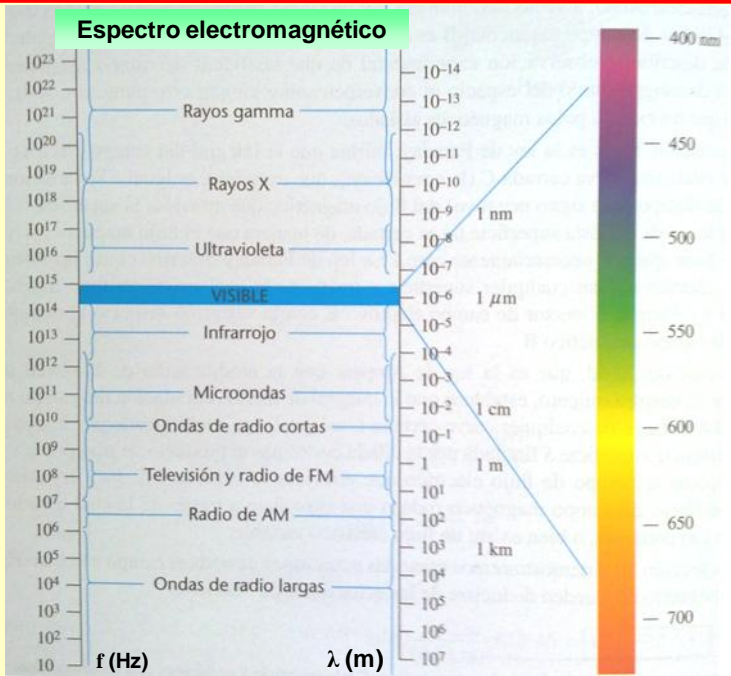
Relación entre momento y energía de una onda electromagnética

$$p = \frac{U}{c}$$

Presión de radiación

$$P_R = \frac{I}{c}$$

Espectro electromagnético



$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

Cargas eléctricas en reposo o en movimiento uniforme (corriente estacionaria) originan campos estáticos.

Para originar RADIACIÓN los campos primarios deben ser variables en el tiempo.

Producción de ondas electromagnéticas

- Cargas eléctricas aceleradas (o desaceleradas)
- Transiciones electrónicas entre estados de energía en átomos y moléculas

Dipolo eléctrico oscilante

Dipolo magnético oscilante

Propagación en la materia: DISPERSIÓN

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}}$$

$$n = \frac{c}{v} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \sqrt{\epsilon \mu}$$

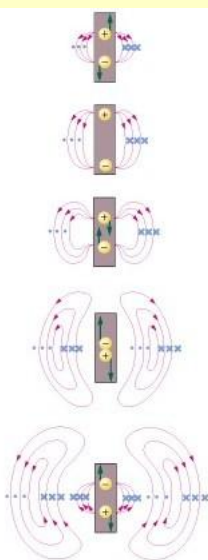
$$n = \frac{c}{v} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \sqrt{\epsilon \mu}$$

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \approx \sqrt{\epsilon_r}$$

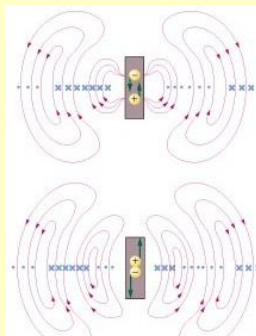
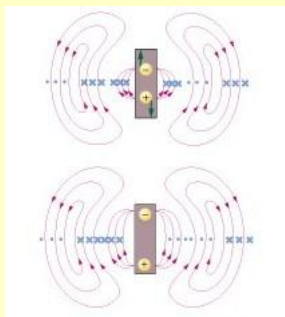
ϵ_r es una magnitud que depende de la frecuencia del campo electromagnético

Radiación de dipolos oscilantes

Dipolos eléctricos o magnéticos



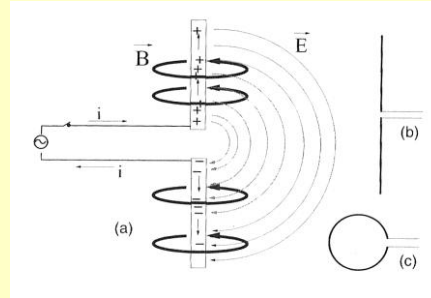
- Líneas de los campos eléctrico (rojo) y magnético (azul) producidas por un **dipolo eléctrico oscilante**.
- **Radiación dipolar eléctrica**. Muchas ondas electromagnéticas presentan las características de esta radiación.
- El producto vectorial de $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ esta dirigido hacia fuera del dipolo en todos los puntos, y coincide con la dirección y sentido del **vector de Poynting (\mathbf{S})**, cuyo módulo es la intensidad de la onda y su dirección la dirección de propagación de la onda.



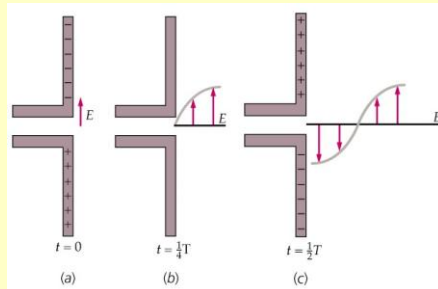
Antenas

Una antena es un circuito que emite ondas electromagnéticas de forma eficiente

- La eficiencia en la emisión depende de la **geometría del circuito emisor**.
- Si se abren las placas de un condensador, el **campo eléctrico** alterno deja de estar confinado al volumen entre las mismas y **se irradia hacia el exterior**.
- La situación óptima aparece cuando las placas forman dos **varillas**.



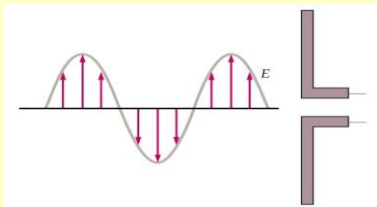
Emisión de OEM



- Las **líneas de campo eléctrico** se asemejan a las creadas por un **dipolo eléctrico**.
- Las **líneas de campo magnético** son **circunferencias concéntricas** alrededor de la antena.
- **E** y **B** son **perpendiculares**.
- **E** es **máximo** en todos los puntos de la varilla.
- **B** es **nulo** en los puntos del eje de la varilla.
- **E** y **B** oscilan con la **frecuencia** del alternador conectado al circuito.
- **E** y **B** se propagan **radialmente** alejándose de la antena a la velocidad c (en el vacío).

Detección de OEM

Las **ecuaciones de Maxwell** indican que la **fuentes de radiación** cuando las ondas se alejan de la antena es la **propia onda electromagnética**.



- Un **campo eléctrico** alterno que incide sobre una antena actuará sobre las cargas libres de la misma, creando una **corriente alterna**.
- La antena debe disponerse orientada de forma **paralela** al campo.

- El campo magnético variable que transporta la radiación produce un **flujo magnético variable** a través del área de la antena.
- La Ley de Faraday, indica que se induce una **fuerza electromotriz alterna** que producirá una corriente en el circuito de la antena.
- La antena debe orientarse **perpendicular** al campo magnético.

