

1. Movimiento ondulatorio. Generalidades	1
2. Ondas elásticas y ondas electromagnéticas	2
3. Descripción matemática del movimiento ondulatorio. Ecuación de ondas	3
4. Ondas armónicas. Ecuación de Helmholtz	5
5. Frecuencia y longitud de onda de una onda armónica	6
6. Ondas periódicas no armónicas. Análisis de Fourier del movimiento ondulatorio	8
7. Ondas longitudinales y transversales	9
8. Polarización	10
9. Ondas planas, cilíndricas y esféricas	13
10. Vector propagación	16
11. Representación fasorial de ondas armónicas	17
12. Velocidad de fase y velocidad de grupo	19
13. Ondas electromagnéticas en el vacío	21
14. Propagación de ondas EM en la materia	27
15. Regiones de campo cercano y de campo lejano	33
16. Espectro electromagnético	36
17. Aspectos biológicos de los campos EM	42
18. Antenas	51
Apéndice 1. Series de Fourier	65
Apéndice 2. Magnitudes físicas y unidades	68
Apéndice 3. Glosario	71

1. MOVIMIENTO ONDULATORIO. GENERALIDADES

Todos estamos familiarizados con la idea de onda; así, cuando se deja caer una piedra a un estanque, las ondas de agua marchan radialmente hacia fuera, al tocar la guitarra vibran las cuerdas y las ondas sonoras se extienden en la proximidad del instrumento, cuando una emisora de radio está transmitiendo, las ondas electromagnéticas se propagan a través del aire o del vacío. Todos estos son ejemplos de movimiento ondulatorio y tienen en común dos importantes **propiedades**: la energía se traslada a puntos distantes y la perturbación marcha a través del medio sin que éste en su totalidad sufra ningún desplazamiento permanente.

El movimiento ondulatorio consiste en la **propagación de una propiedad física o una perturbación** (variación de alguna magnitud física) descrita por un cierto campo, a través de un medio.

El campo que describe la propiedad física puede ser:

- Un campo electromagnético (caso de **ondas electromagnéticas**).
- El desplazamiento transversal de una cuerda, la deformación de un resorte, la presión de un gas, etc. (caso de **ondas elásticas**).

El medio que transmite las ondas puede ser el aire, una cuerda tensa, un líquido, etc. e, incluso el vacío (sólo para el caso de ondas electromagnéticas).

Como la afirmación de que lo que se propaga en el movimiento ondulatorio es una propiedad física o perturbación es algo abstracta, conviene concretarla: **En un movimiento ondulatorio se transmite o propaga una condición dinámica**, esto es, cantidad de movimiento y energía.

Cualquiera que sea la naturaleza del medio que transmite las ondas, ya sea el aire, una cuerda tensa, un cable eléctrico o el vacío, todos los movimientos ondulatorios están regidos por una cierta ecuación diferencial, la ecuación del movimiento ondulatorio. La parte matemática del problema consiste meramente en resolver esta ecuación con las adecuadas condiciones de contorno e interpretar después la solución apropiadamente.

2. ONDAS ELÁSTICAS Y ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Las ondas elásticas requieren un medio material como soporte a su transmisión. Tal sucede con las ondas sonoras, ondas en cuerdas, membranas, etc. En cambio, las **ondas electromagnéticas** no requieren necesariamente un medio material para su propagación.

Con la excepción de las ondas superficiales en un líquido, la perturbación (sea ésta una deformación, una presión o el desplazamiento de un volumen) se propaga con una velocidad que depende de las propiedades elásticas del medio. Estas **ondas elásticas** son también llamadas sonido. En el lenguaje vulgar el sonido está relacionado con la sensación auditiva, i.e., vibraciones en la membrana auditiva provocadas por una onda elástica que se propaga a través de un gas, un líquido o un sólido. Sin embargo nuestro sistema nervioso sólo es sensible a frecuencias comprendidas entre 16 *Hz* y 20 *kHz*. Fuera de estos límites el sonido no es audible para los humanos, aunque a las ondas elásticas correspondientes se les sigue llamando **sonido**. La física de las ondas elásticas de frecuencia por encima de los 20 *kHz* se denomina **ultrasónica**. La ciencia que trata de los métodos de generación, propagación y recepción del sonido se llama **acústica**.

En ambos tipos de ondas –elásticas y electromagnéticas- son las **Ecuaciones de Maxwell** las que explican la transmisión a distancia de energía y cantidad de movimiento.

Tanto las ondas elásticas como las electromagnéticas satisfacen la “Ecuación de ondas” y su estudio formal es idéntico, aunque hay muchas diferencias en cuanto a velocidad de propagación, fenómenos de dispersión, etc.

3. DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA DEL MOVIMIENTO ONDULATORIO. ECUACIÓN DE ONDAS

Sea ξ una perturbación, por ejemplo la altura de una ola, un campo eléctrico oscilante, etc., que se propaga a través de un medio con una velocidad definida v sin distorsión. La perturbación satisface la ecuación:

$$\nabla^2 \xi = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$$

Ésta es la ecuación del movimiento ondulatorio, también llamada **Ecuación de ondas de D'Alembert**. Es una de las ecuaciones diferenciales más importantes de toda la matemática, puesto que representa todos los tipos de movimiento ondulatorio en que la velocidad es constante. La perturbación ξ puede tener carácter escalar o vectorial.

La ecuación de ondas es lineal, por lo que es aplicable el **Principio de Superposición**, es decir, si ξ_1 y ξ_2 son dos soluciones cualesquiera, entonces $a_1 \xi_1 + a_2 \xi_2$ es también solución, siendo a_1 y a_2 dos constantes arbitrarias.

La solución general de esta ecuación diferencial se obtiene por el método de D'Alembert y resulta:

$$\xi = f_1(x - vt) + f_2(x + vt)$$

donde f_1 y f_2 son dos funciones arbitrarias.

$f_1(x - vt)$ representa una perturbación u onda que se mueve con velocidad constante v y sin distorsión en la dirección positiva del eje OX .

$f_2(x + vt)$ representa una perturbación que se mueve con velocidad constante v y sin cambio de forma en la dirección negativa del eje OX .

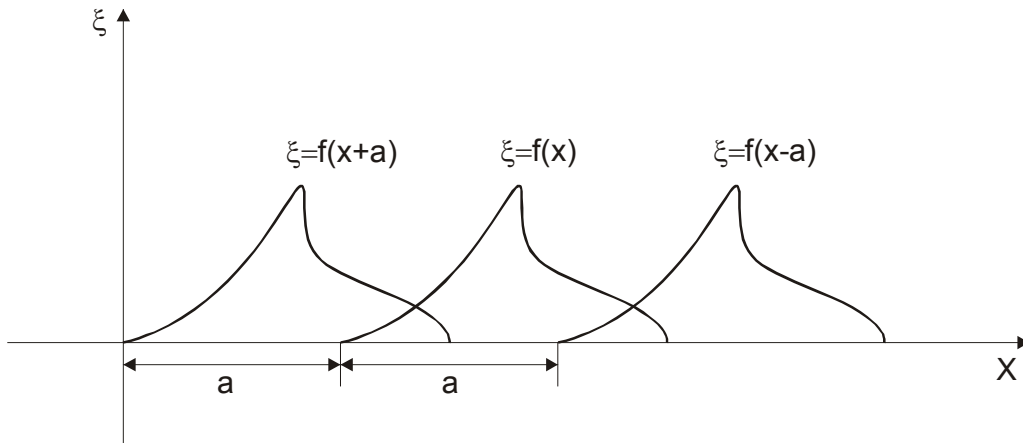


FIG. 1 Traslación de la función $\xi(x)$ sin distorsión

El valor de la perturbación $\xi(x,t)$ que se mueve en la dirección positiva o negativa del eje OX , cuando $t = 0$ es una función $f(x)$ que recibe el nombre de **perfil de onda**.

4. ONDAS ARMÓNICAS. ECUACIÓN DE HELMHOLTZ

En las ondas armónicas o monocromáticas el perfil de onda es una senoide:

$$\xi(x, t) \Big|_{t=0} = \xi_0 \cos kx$$

La perturbación, con su doble dependencia -espacial y temporal-, satisface la ecuación de ondas de D'Alembert, que ahora se convierte en la Ecuación de **Helmholtz**, para ondas armónicas:

$$\xi(x, t) = \xi_0 \cos k(x - vt)$$

$$\nabla^2 \xi + k^2 \xi = 0$$

ξ_0 es el valor máximo de la perturbación o **amplitud** y k recibe el nombre de **número de onda**.

5. FRECUENCIA Y LONGITUD DE ONDA DE UNA ONDA ARMÓNICA

Como la perturbación o condición dinámica ξ tiene una doble dependencia, espacial y temporal, se definen un “período espacial” λ y un “período temporal” T .

a) Período espacial λ

$$\xi(x, t) = \xi(x + \lambda, t)$$

⇓

$$\xi_0 \cos k(x - vt) = \xi_0 \cos k(x + \lambda - vt)$$

⇓

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

que es el “período espacial” o **longitud de onda**, ya que la curva se repite a sí misma cada longitud λ .

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ recibe el nombre de **número de onda** y representa el número de longitudes de onda en la distancia 2π . Algunas veces se da el nombre de número de onda a la cantidad $\frac{1}{\lambda}$, que corresponde con el número de longitudes de onda en la unidad de longitud.

b) Período temporal T

$$\xi(x, t) = \xi(x, t + T)$$

⇓

$$\xi_0 \cos k(x - vt) = \xi_0 \cos k(x - vt - vT)$$

⇓

$$kvT = 2\pi \Rightarrow T = \frac{2\pi}{kv} = \frac{\lambda}{v}$$

El inverso del período T es la frecuencia f :

$$f = \frac{1}{T} = \frac{v}{\lambda}$$

Por tanto, la longitud de onda $\lambda = vT$ se puede definir como la distancia que avanza el movimiento ondulatorio en un período.

La **pulsación** ω o frecuencia angular de la onda es:

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

En efecto,

$$\xi(x, t) = \xi_0 \cos k(x - vt) = \xi_0 \cos(kx - kvt) = \xi_0 \cos\left(kx - \frac{2\pi}{T}t\right) = \xi_0 \cos(kx - \omega t)$$

El número de onda, también se puede expresar:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{v} = \frac{\omega}{v}$$

con lo que la Ecuación de Helmholtz queda:

$$\nabla^2 \xi + \frac{\omega^2}{v^2} \xi = 0$$

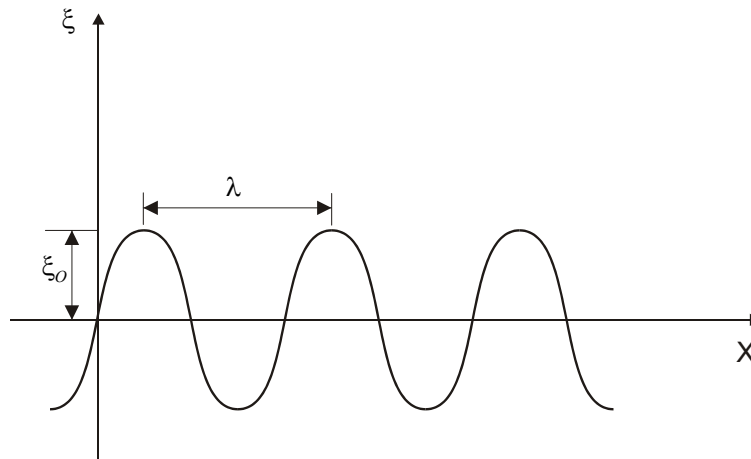


FIG. 2 Onda armónica

6. ONDAS PERIÓDICAS NO ARMÓNICAS. ANÁLISIS DE FOURIER DEL MOVIMIENTO ONDULATORIO

Según el **Teorema de Fourier** (ver APÉNDICE 1), cualquier función periódica de período fundamental T , se puede expresar como suma de " n " funciones senoidales de períodos $T, T/2, \dots, T/n$.

Como la Ecuación de Ondas es lineal, es posible aplicar el Principio de Superposición, con lo que el desarrollo en serie de Fourier es una herramienta de gran utilidad, cuando se tienen ondas periódicas no armónicas.

En definitiva, cualquier movimiento ondulatorio periódico se puede expresar como suma de movimientos ondulatorios de frecuencias $\omega, 2\omega, \dots, n\omega$ y longitudes de onda $\lambda, 2\lambda, \dots, n\lambda$. Aplicando el Principio de Superposición, la respuesta ante una excitación periódica cualquiera, se obtendría como suma de las respuestas aisladas o individuales a " n " excitaciones.

7. ONDAS LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES

Frecuentemente, la perturbación que se propaga dando lugar al movimiento ondulatorio, se mide o por desplazamientos de las partículas de un medio elástico o por variaciones de una magnitud vectorial, como sucede en el caso de ondas EM.

En cualquiera de los casos puede suceder que los desplazamientos de las partículas en torno a su posición de equilibrio, o las variaciones de la magnitud vectorial, tengan la misma dirección que la propagación, o dirección normal a la de propagación. Respectivamente, se habla de ondas “longitudinales” y “transversales”.

Las ondas sonoras, por ejemplo, son longitudinales. **Las ondas EM**, en las que las magnitudes características de la perturbación son los campos eléctrico y magnético, son transversales. **Los campos eléctrico y magnético son perpendiculares entre sí y están situados en un plano normal a la dirección de propagación.**

Las ondas superficiales en líquidos, poseen simultáneamente carácter longitudinal y transversal: tanto el desplazamiento vertical como el horizontal satisfacen la Ecuación de Ondas.

8. POLARIZACIÓN

En las ondas transversales, la propiedad física que se propaga $\vec{\xi}$, estando en un plano normal a la dirección de propagación, en general, no se mantiene en la misma dirección al propagarse, sino que el extremo del vector $\vec{\xi}$ describe una hélice cilíndrica, de donde surgen los diversos tipos de polarización de las ondas. Las figuras siguientes aclaran este fenómeno de la polarización.

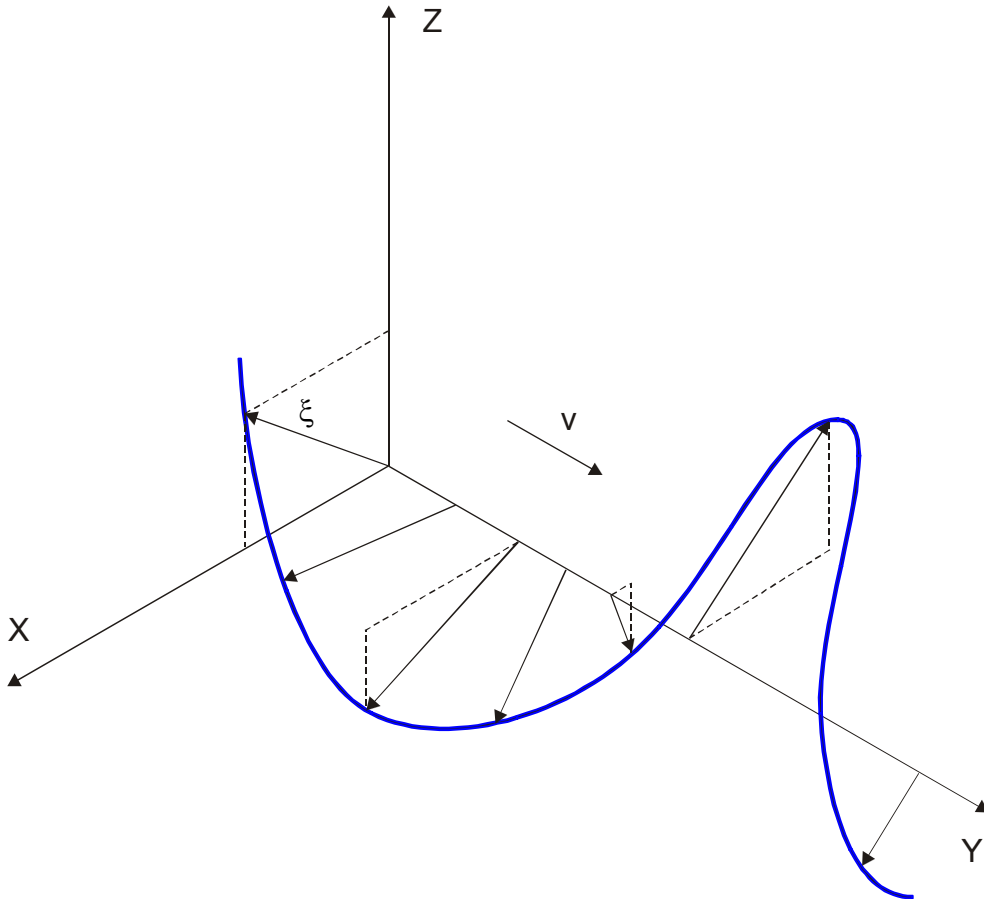


FIG. 3 Onda transversal no polarizada en una cuerda

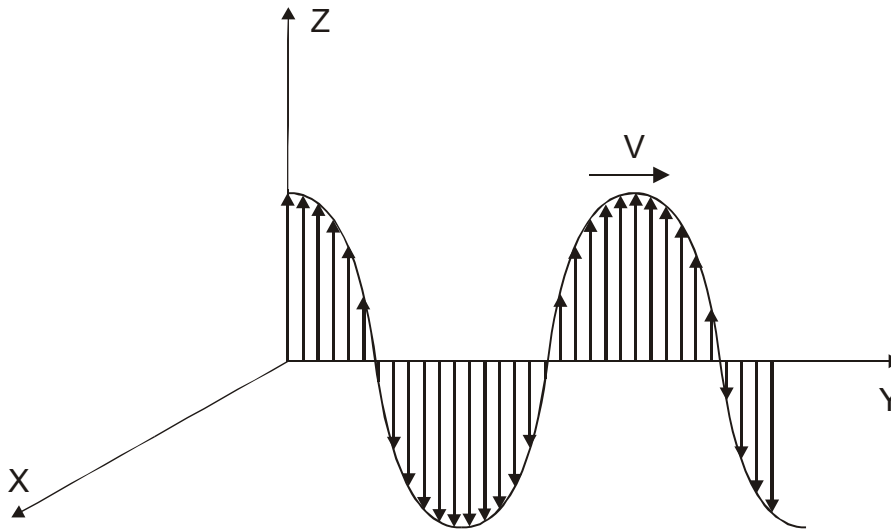


FIG. 4 Onda transversal polarizada linealmente en una cuerda

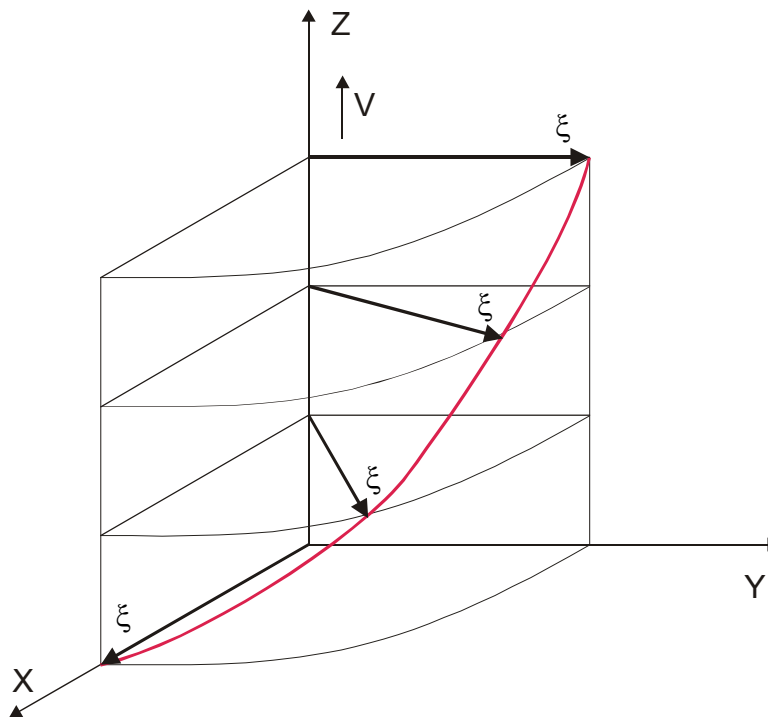


FIG. 5 Polarización elíptica de una onda transversal

En las ondas EM los campos \vec{E} y \vec{H} tienen componentes sobre un plano normal a la dirección de propagación. En general, puede haber un desfase φ entre ambas componentes. Para el campo eléctrico, por ejemplo, se tiene:

$$\begin{cases} E_x = E_{x_0} \cos(\omega t - kz) \\ E_y = E_{y_0} \cos(\omega t - kz + \varphi) \end{cases}$$

Haciendo $z = 0$ y eliminando $\cos(\omega t)$ en las ecuaciones anteriores:

$$\left[\frac{E_x}{E_{x_0}} \right]^2 + \left[\frac{E_y}{E_{y_0}} \right]^2 - 2 \frac{E_x E_y}{E_{x_0} E_{y_0}} \cos \varphi = \text{sen}^2 \varphi$$

que es la ecuación de una elipse en el plano XY .

Entonces, el extremo del vector \vec{E} (lo mismo para el vector \vec{H}) de una onda plana describe una hélice de sección elíptica. El sentido de giro puede ser horario o antihorario.

Como casos particulares conviene destacar:

- Si $\varphi = \pm n\pi$ la elipse degenera en una recta. Se habla de **polarización lineal**.
- Si $\varphi = \pm(2n+1)\frac{\pi}{2}$ la elipse se convierte en una circunferencia. Se trata de **polarización circular**.

9. ONDAS PLANAS, CILÍNDRICAS Y ESFÉRICAS

Se denomina **frente de onda** al lugar geométrico de los puntos donde –en un tiempo dado t – la perturbación ξ toma el mismo valor.

a) Ondas planas

Los frentes de onda son planos perpendiculares a la dirección de propagación. Si ésta es OY como muestra la figura,

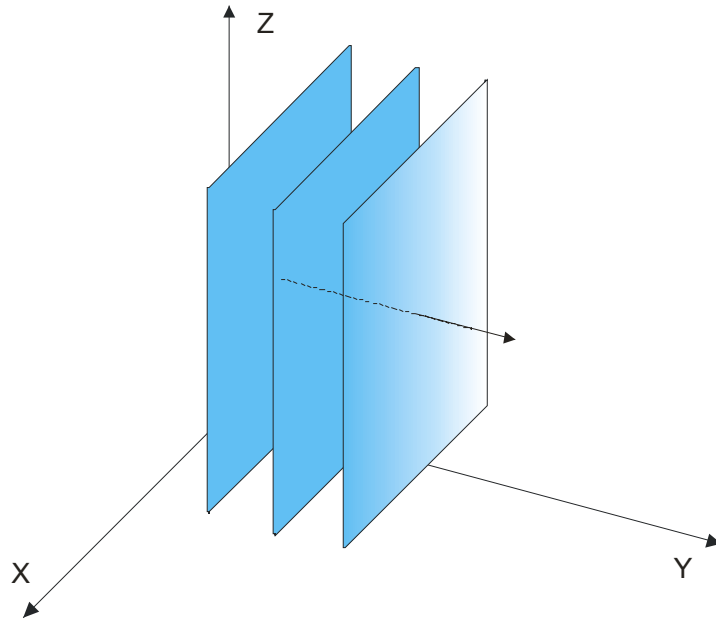


FIG. 6 Ondas Planas

$$\xi(\vec{r}, t) = \xi(y, t) = \xi(y \mp vt)$$

Si se trata de ondas EM, propagándose según el eje OX :

$$\begin{aligned} \vec{E}(\vec{r}, t) &= \vec{E}(x, t) = \vec{E}(x \mp vt) \\ \vec{H}(\vec{r}, t) &= \vec{H}(x, t) = \vec{H}(x \mp vt) \end{aligned}$$

Los campos dependen de una única coordenada espacial y del tiempo.¹

¹ El doble signo depende de que la onda sea progresiva o regresiva

b) Ondas esféricas

Los frentes de onda son esferas concéntricas, con centro en el punto donde se originó la perturbación.

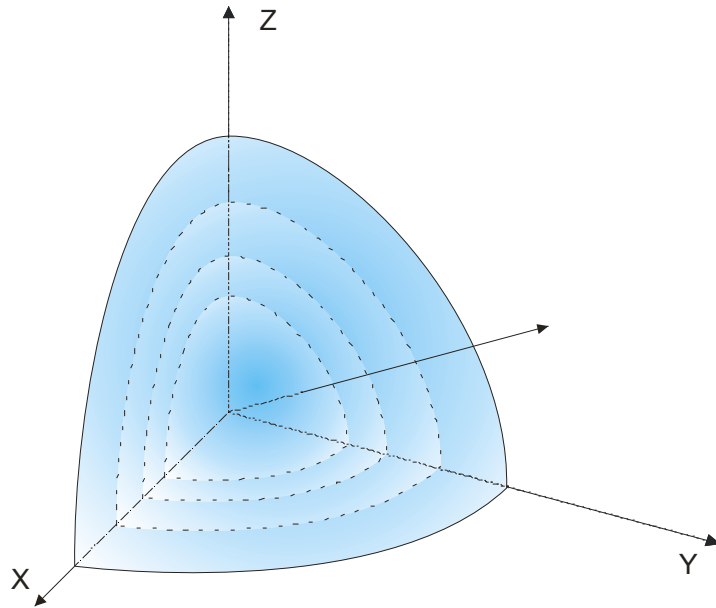


FIG. 7 Ondas Esféricas

$$\xi(\vec{r}, t) = \xi(r, t) = \frac{f(r \mp vt)}{r}$$

Para ondas EM:

$$\begin{aligned} \vec{E}(\vec{r}, t) &= \vec{E}(r, t) \\ \vec{H}(\vec{r}, t) &= \vec{H}(r, t) \end{aligned}$$

Los campos dependen sólo de la distancia r a un punto de referencia que se toma como origen de coordenadas.

La existencia de ondas esféricas implica que el medio sea "isótropo", esto es, que la velocidad de propagación ha de ser la misma en todas las direcciones.

Este tipo de ondas, en las que los campos dependen sólo de la distancia a un punto de referencia (una única coordenada) reciben el nombre de **ondas elementales**.

Naturalmente que existen ondas esféricas no elementales en las que la amplitud o intensidad no es la misma en todas las direcciones, porque la fuente de perturbación produzca efectos diferentes, dependiendo de la dirección. Tal ocurre, por ejemplo con la onda sonora procedente de una corneta o con las ondas EM radiadas por **antenas direccionales** o sectoriales, utilizadas en telefonía celular, en la que la “**Directividad**” (relación entre la densidad de potencia máxima y la densidad de potencia promedio sobre una esfera) es un parámetro ≥ 1 que mide el grado de anisotropía de la radiación.

En la región denominada “de campo lejano”, las ondas EM radiadas por una antena se suponen esféricas, que se comportan localmente como planas.

c) Ondas cilíndricas

Los frentes de onda son superficies paralelas a una recta. En las ondas cilíndricas elementales los campos dependen sólo de la distancia ρ a un eje de referencia.

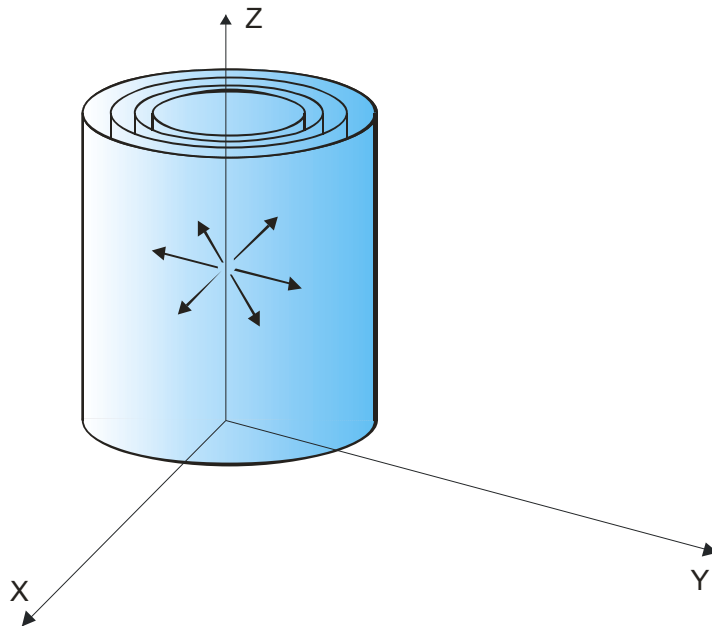


FIG. 8 Ondas Cilíndricas

$$\xi(\vec{r}, t) = \xi(\rho, t)$$

Para el caso de ondas EM:

$$\begin{aligned} \vec{E}(\vec{r}, t) &= \vec{E}(\rho, t) \\ \vec{H}(\vec{r}, t) &= \vec{H}(\rho, t) \end{aligned}$$

10. VECTOR DE PROPAGACIÓN

$$\xi(x, t) = \xi_0 \frac{\text{sen}}{\text{cos}} k(x - vt) = \xi_0 \frac{\text{sen}}{\text{cos}} (kx - \omega t)$$

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

representa una onda plana monocromática progresiva que se propaga según $+OX$. En muchas ocasiones es necesario describir la propagación de una onda en una dirección cualquiera del espacio \vec{n} .²

Para ello se define el **vector de onda** o **vector de propagación**:

$$\vec{k} = k\vec{n}$$

siendo $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ el número de onda.

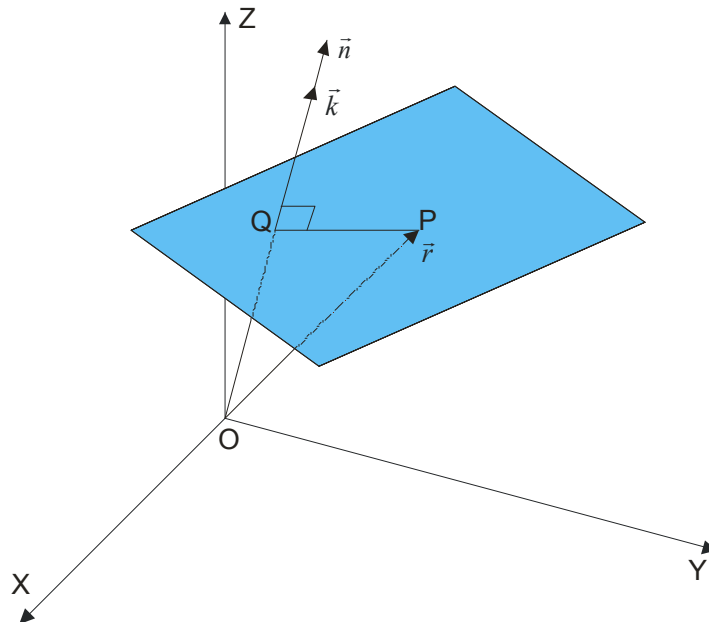


FIG. 9 Vector de onda

$$\xi(\vec{r}, t) = f(\vec{n} \cdot \vec{r} - vt) = \xi_0 \text{sen } k(\vec{n} \cdot \vec{r} - vt) = \xi_0 \text{sen } (\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)$$

² \vec{n} es un vector unitario o versor en la dirección de propagación.

11. REPRESENTACIÓN FASORIAL DE ONDAS ARMÓNICAS

Cuando todas las ondas involucradas en un problema son armónicas o monocromáticas y de idéntica frecuencia, es útil la representación fasorial o compleja.

Una onda armónica elemental de amplitud ξ_0 , número de onda k , que se propaga en la dirección positiva del eje OX , se representa formalmente por:

$$\xi(x, t) = \xi_0 \cos(\omega t - kx) = \operatorname{Re}\left\{\bar{\xi}_0(x) \cdot e^{j\omega t}\right\}$$

donde, $\bar{\xi}_0(x) = \xi_0 e^{-jkx}$ es el **fasor temporal** o complejo que representa a la onda monocromática $\xi(x, t)$.

En general, la perturbación ξ tiene carácter vectorial y se propaga en cualquier dirección. Para el caso de ondas EM, los **vectores instantáneos** de los campos eléctrico y magnético son:

$$\begin{aligned}\vec{E} &= \vec{E}(x, y, z, t) = \vec{E}(\vec{r}, t) \\ \vec{H} &= \vec{H}(x, y, z, t) = \vec{H}(\vec{r}, t)\end{aligned}$$

Si las ondas son armónicas, la representación fasorial de los campos es:

$$\begin{aligned}\vec{E}(\vec{r}, t) &= \operatorname{Re}\left\{\bar{E}(\vec{r}) \cdot e^{j\omega t}\right\} = \bar{E}_o \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}) \\ \vec{H}(\vec{r}, t) &= \operatorname{Re}\left\{\bar{H}(\vec{r}) \cdot e^{j\omega t}\right\} = \bar{H}_o \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})\end{aligned}$$

siendo:

$$\begin{aligned}\bar{E}(\vec{r}) &= \bar{E}_o \cdot e^{-j\vec{k} \cdot \vec{r}} \\ \bar{H}(\vec{r}) &= \bar{H}_o \cdot e^{-j\vec{k} \cdot \vec{r}}\end{aligned}$$

Los fasores que representan una onda EM de amplitud $E_o - H_o$, pulsación ω y vector de propagación \vec{k} .

Si la onda es linealmente polarizada \bar{E}_o y \bar{H}_o tendrán una posición fija y perpendiculares a \vec{k} . Por ejemplo, para una onda polarizada linealmente según OX que se propaga en la dirección positiva del eje OZ el vector instantáneo del campo eléctrico se expresa:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = E_o \hat{x} \cos(\omega t - kz) = \vec{E}_o \cos(\omega t - kz) = \text{Re} \left\{ \vec{E}_o \cdot e^{-jkz} \cdot e^{j\omega t} \right\} = \text{Re} \left\{ \vec{E} \cdot e^{j\omega t} \right\}$$

A menudo se confunden los vectores instantáneos $\vec{E}(\vec{r}, t)$ y $\vec{H}(\vec{r}, t)$ con los complejos o fasores temporales $\vec{E}(\vec{r})$ y $\vec{H}(\vec{r})$. A este respecto, es importante señalar que, cuando se realizan operaciones lineales (suma, derivación, integración, etc.) se puede operar con valores complejos y tomar al final la parte real u operar desde el principio con las partes reales. Sin embargo, si la operación a realizar no es lineal (producto, potencias, etc.) es imprescindible operar desde el principio con las partes reales, esto es, con los “vectores instantáneos” que representan las magnitudes físicas verdaderas.

12. VELOCIDAD DE FASE Y VELOCIDAD DE GRUPO

La velocidad $v = \frac{\omega}{k}$ para una onda armónica, se llama **velocidad de fase**. Sin embargo esta no es la velocidad de propagación real que se observa en todos los movimientos ondulatorios.

Una onda continua puede contar de una sola longitud de onda y de una sola frecuencia, pero este tipo de onda no es adecuada para transmitir una señal que, necesariamente, implica algo que empieza en un cierto instante y que termina al cabo de un cierto tiempo. Esto se conoce como “pulso” o “tren de ondas”.

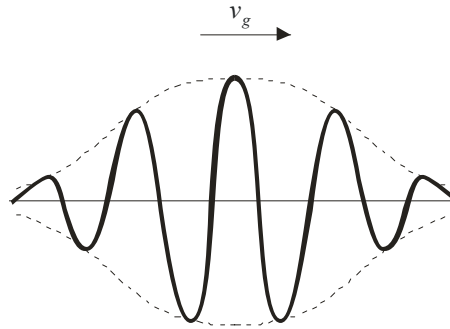


FIG. 10 Tren de ondas

A la velocidad con la que el pulso viaja se le llama **velocidad de grupo** que, en general, no tiene por que coincidir con la velocidad de fase.

Un tren de ondas o pulso no es una onda armónica o monocromática. Desarrollando en serie de Fourier se tienen varias frecuencias y varias longitudes de onda.

Para el caso de un pulso que contenga frecuencias entre $\omega - \Delta\omega$ y $\omega + \Delta\omega$, siendo $\Delta\omega$ pequeño (señal de banda angosta), se demuestra que la velocidad de grupo es:

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{d}{dk}(k \cdot v) = v + k \frac{dv}{dk}$$

Si el **medio no es dispersivo**, la velocidad v es independiente de la frecuencia, por tanto:

$$v_g = v$$

Si el **medio es dispersivo**, la velocidad de grupo puede ser mayor o menor que la velocidad de fase. Esto lleva a una deformación de la onda del paquete que, desde el

punto de vista de transmisión de información codificada en señales electromagnéticas, se traduce en distorsión y/o pérdida de datos.

Los medios dispersivos se clasifican:

a) Dispersión normal:

$$\frac{dv}{d\lambda} > 0 \Rightarrow v_g < v$$

b) Dispersión anómala:

$$\frac{dv}{d\lambda} < 0 \Rightarrow v_g > v$$

En los materiales con pérdidas, o sea, conductores, la dispersión es siempre anómala.

13. ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS EN EL VACÍO

13.1. Ecuaciones de Maxwell

Antes de las experiencias de Hertz, la existencia de ondas electromagnéticas había sido predicha por Maxwell, como resultado de un análisis de las ecuaciones del campo electromagnético –“Ecuaciones de Maxwell” (1873)- :

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \vec{D}(\vec{r}, t) &= \rho(\vec{r}, t) \\ \nabla \cdot \vec{B}(\vec{r}, t) &= 0 \\ \nabla \times \vec{E}(\vec{r}, t) + \frac{\partial}{\partial t} \vec{B}(\vec{r}, t) &= 0 \\ \nabla \times \vec{H}(\vec{r}, t) - \frac{\partial}{\partial t} \vec{D}(\vec{r}, t) &= \vec{J}(\vec{r}, t) \end{aligned}$$

Respectivamente, son la Ley de Gauss para el campo eléctrico, la Ley de Gauss para el campo magnético, la Ley de Faraday-Lenz y la Ley de Ampère-Maxwell.

\vec{D}	desplazamiento eléctrico.
\vec{B}	inducción magnética
\vec{E}	campo eléctrico
\vec{H}	excitación magnética
ρ	densidad (volúmica) de carga
\vec{J}	densidad (superficial) de corriente

Además:

$$\begin{aligned} \vec{D} &= \varepsilon \cdot \vec{E} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \vec{E} \\ \vec{B} &= \mu \cdot \vec{H} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \vec{H} \end{aligned}$$

ε	constante dieléctrica o permitividad absoluta del medio
ε_r	permitividad relativa del medio
ε_0	constante dieléctrica del vacío
μ	permeabilidad absoluta del medio
μ_r	permeabilidad relativa del medio
μ_0	permeabilidad del vacío

Si el recinto es el vacío y no hay fuentes de campo en su interior:

$$\begin{aligned}\vec{D} &= \epsilon_0 \cdot \vec{E} \\ \vec{B} &= \mu_0 \cdot \vec{H} \\ \rho &= 0 \\ \vec{J} &= 0\end{aligned}$$

resultando las Ecuaciones de Maxwell:

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \vec{E} &= 0 \\ \nabla \cdot \vec{H} &= 0 \\ \nabla \times \vec{E} + \mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} &= 0 \\ \nabla \times \vec{H} - \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} &= 0\end{aligned}$$

Manipulando las cuatro ecuaciones anteriores, se obtiene:

$$\begin{aligned}\nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} &= 0 \\ \nabla^2 \vec{H} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} &= 0\end{aligned}$$

con $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} \cong 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$ que es la **velocidad de la luz** (o de cualquier onda EM) en el vacío.

Estas últimas se conocen como **ecuaciones vectoriales de D'Alembert** o **ecuación de ondas**.

En coordenadas cartesianas, cada componente de los campos debe satisfacer la ecuación de ondas, que suele llamarse ahora **ecuación escalar de D'Alembert**.

Por tanto, **las soluciones de las ecuaciones de Maxwell en el vacío, sin fuentes de campo, son ondas EM**.

13.2. Ecuaciones de Maxwell en forma fasorial

Cuando se trata de ondas monocromáticas o armónicas, las ecuaciones de Maxwell – inicialmente expresadas en términos de vectores instantáneos $\vec{E}(\vec{r}, t)$, $\vec{H}(\vec{r}, t)$, etc.- pueden rescribirse en forma fasorial o compleja:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \bar{D} = \rho \\ \nabla \cdot \bar{B} = 0 \\ \nabla \times \bar{E} + j\omega \cdot \bar{B} = 0 \\ \nabla \times \bar{H} = j\omega \cdot \bar{D} + \bar{J} \end{cases}$$

siendo la relación entre vectores instantáneos y magnitudes fasoriales:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \text{Re}\{\bar{E}(\vec{r}) \cdot e^{j\omega t}\}, \text{ etc.}$$

como ya se indicó en el epígrafe 11. REPRESENTACIÓN FASORIAL DE ONDAS ARMÓNICAS.

13.3. Fuentes de ondas electromagnéticas

Las fuentes de ondas EM son, evidentemente, las mismas que las del campo EM, o sea, **cargas eléctricas en movimiento**.

Dos casos particularmente interesantes son:

- Cargas en movimiento formando un dipolo eléctrico oscilante.
- Cargas en movimiento constituyendo un dipolo magnético oscilante.

Los dipolos eléctrico y magnético son, junto con las ranuras o aberturas radiantes, los tres tipos básicos de radiadores. La combinación de estos tres tipos elementales lleva a la mayoría de los tipos de antenas de uso en la técnica.

La solución de las ecuaciones de Maxwell para el caso del dipolo eléctrico y del dipolo magnético oscilantes es un problema matemático complejo. Las conclusiones más importantes se tratan en el epígrafe 18. ANTENAS.

13.4. Condiciones de transversibilidad y relación entre \vec{E} y \vec{H}

Las ecuaciones de Maxwell imponen ciertas restricciones a los campos \vec{E} y \vec{H} , que se pueden resumir en los siguientes puntos:

- En todo punto del espacio y en todo instante los campos \vec{E} y \vec{H} se hallan sobre planos perpendiculares a la dirección de propagación. Se dice que son campos u **ondas transversales**.
- Los campos \vec{E} y \vec{H} son perpendiculares entre sí, cumpliéndose:

$$\vec{H}(\vec{r}, t) = \pm \frac{\vec{n} \times \vec{E}(\vec{r}, t)}{\eta_0}$$

donde \vec{n} es un versor en la dirección de propagación y η_0 es la **impedancia intrínseca del vacío**.

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = \sqrt{\frac{4\pi \times 10^{-7}}{\frac{10^{-9}}{36\pi}}} = 120\pi \cong 377 \Omega$$

En resumen **los campos \vec{E} y \vec{H} son perpendiculares entre sí y ambos resultan perpendiculares a la dirección de propagación, estando relacionados a través de la impedancia intrínseca.**

Las relaciones de transversibilidad y entre los campos \vec{E} - \vec{H} son válidas para cualquier forma de onda –plana, cilíndrica o esférica- elemental, sin fuentes en el recinto de integración (campo eléctrico solenoidal⁴).

13.5. Vector de Poynting y densidad de energía

El vector de Poynting se define como el producto vectorial de \vec{E} por \vec{H} :

$$\vec{P}(\vec{r}, t) = \vec{E}(\vec{r}, t) \times \vec{H}(\vec{r}, t) = \vec{E}(\vec{r}, t) \times \frac{\vec{n} \times \vec{E}(\vec{r}, t)}{\eta_0} = \frac{E^2(\vec{r}, t)}{\eta_0} \vec{n} \quad (\text{W.m}^{-2})$$

El promedio temporal del vector de Poynting de una onda representa la potencia media que la onda transporta por unidad de área transversal a la propagación y se conoce como **densidad de potencia**.

³ El doble signo depende de que la onda sea progresiva (propagación en sentido creciente de \vec{n}) o regresiva.

⁴ De divergencia nula.

$$\vec{P}_{medio} = \frac{1}{T} \int_0^T (\vec{E} \times \vec{H}) dt$$

Si se trata de ondas armónicas, utilizando la representación fasorial:

$$\vec{P}_{medio} = \frac{1}{T} \int_0^T (\vec{E} \times \vec{H}) dt = \frac{1}{2} \text{Re}\{\vec{E} \times \vec{H}^*\} = \frac{E_o^2}{2\eta_o} \vec{n} = \frac{E_{rms}^2}{\eta_o} \vec{n} \quad ^5$$

Al no depender del tiempo \vec{P}_{medio} -en el caso de ondas armónicas- es un fasor, por lo que también es correcto:

$$\vec{P}_{medio} = \frac{1}{2} \text{Re}\{\vec{E} \times \vec{H}^*\} = \frac{E_o^2}{2\eta_o} \vec{n} = \frac{E_{rms}^2}{\eta_o} \vec{n} = \mathcal{S} \cdot \vec{n}$$

siendo \mathcal{S} la **densidad de potencia** (escalar):

$$\mathcal{S} = \frac{E_{rms}^2}{\eta_o} = \eta_o H_{rms}^2 = \vec{E}_{rms} \cdot \vec{H}_{rms}$$

La **densidad de energía** de una onda plana en el vacío, puede escribirse:

$$\begin{aligned} \vec{u}(\vec{r}, t) &= \frac{1}{2} [\vec{E}(\vec{r}, t) \cdot \vec{D}(\vec{r}, t) + \vec{H}(\vec{r}, t) \cdot \vec{B}(\vec{r}, t)] = \frac{1}{2} [\epsilon_o E^2(\vec{r}, t) + \mu_o H^2(\vec{r}, t)] = \\ &= \frac{1}{2} \left[\epsilon_o E^2(\vec{r}, t) + \mu_o \frac{E^2(\vec{r}, t)}{\eta_o^2} \right] = \epsilon_o E^2(\vec{r}, t) \quad (\text{Jm}^{-3}) \end{aligned}$$

Se observa que la contribución del campo eléctrico y la del campo magnético son iguales. La energía está "equipartida" entre ambos campos. Además:

$$\frac{\vec{P}(\vec{r}, t)}{\vec{u}(\vec{r}, t)} = \pm \frac{\vec{n}}{\eta_o \cdot \epsilon_o} = \pm \vec{c} \cdot \vec{n}$$

que es la llamada **velocidad de energía** y describe la velocidad con que el frente de onda transporta la energía.

⁵ \vec{H}^* es el conjugado de \vec{H} .

El valor medio de la densidad de energía ⁶ es:

$$u_{\text{medio}} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \cdot E_o^2 = \epsilon_0 \cdot E_{\text{rms}}^2$$

⁶ Supuesto que se trata de una onda armónica de amplitud E_o .

14. PROPAGACIÓN DE ONDAS EM EN LA MATERIA

Cuando una onda EM se propaga, no en el vacío, sino en un medio material cualquiera, la velocidad de propagación no es la misma, además de que tienen lugar otros fenómenos importantes que conviene estudiar, tales como dispersión, reflexión, refracción y absorción.

14.1. Velocidad de propagación

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu}} = \frac{1}{\sqrt{(\varepsilon_0 \cdot \mu_0) \cdot (\varepsilon_r \cdot \mu_r)}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r \cdot \mu_r}} = \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{\varepsilon_r \cdot \mu_r}}$$

Excepto en los materiales ferromagnéticos, $\mu_r \cong 1$, por lo que:

$$v \cong \frac{c}{\varepsilon_r}$$

Para el aire:

$$\varepsilon_r \cong 1 \Rightarrow v \cong c$$

El cociente entre la velocidad de propagación en el vacío y la velocidad en un medio material, recibe el nombre de **índice de refracción absoluto** del medio K .

$$K = \frac{c}{v} = \sqrt{\varepsilon_r \cdot \mu_r}$$

14.2. Dispersión

Los parámetros ε , μ y σ dependen de la frecuencia de los campos armónicos. Cuando una onda no es armónica, como por ejemplo, un pulso o tren de ondas, en realidad contiene muchas frecuencias (desarrollando en serie de Fourier), por lo que al propagarse con diferente velocidad cada una de las componentes monocromáticas, el pulso se distorsiona. Se dice entonces que las ondas EM experimentan una "dispersión" cuando se propagan en la materia.⁷

⁷ En el epígrafe 10. VELOCIDAD DE FASE Y VELOCIDAD DE GRUPO, se definieron la "dispersión normal" y "la dispersión anómala", según el medio material.

14.3. Reflexión y refracción

El hecho de que la velocidad de propagación de una onda dependa de las propiedades del medio da lugar a los fenómenos de reflexión y refracción, que ocurren cuando una onda atraviesa la superficie de separación de dos medios diferentes. La onda reflejada es una nueva onda que se propaga en el medio en el cual la onda original se estaba propagando. La onda refractada es la que se transmite al segundo medio.

Cuando una onda transversal está polarizada, la polarización queda afectada por la reflexión y por la refracción.

14.4. Absorción

El comportamiento de los materiales para campos armónicos obedece a una ley lineal:

$$\begin{cases} \vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} \\ \vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \\ \vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \end{cases}$$

Donde los parámetros ϵ , σ y μ , son complejos que dependen de la frecuencia. El carácter complejo y la dependencia de la frecuencia complican extraordinariamente el aspecto formal, por lo que sólo se analizan dos casos particulares de interés:

- a) Dieléctricos perfectos (sin pérdidas).
- b) Conductores.

El **número de onda complejo**, se define como:

$$\gamma = \sqrt{\omega^2 \cdot \mu \cdot \epsilon - j\omega \cdot \mu \cdot \sigma} = \alpha - j\beta$$

donde la parte real α es el **factor de propagación** y la parte imaginaria (cambiada de signo) β el **factor de atenuación**. El inverso de β es la **profundidad de penetración**.

$$\begin{cases} \text{longitud de onda } \lambda = \frac{2\pi}{\alpha} \\ \text{velocidad de propagación } v = \frac{\omega}{\epsilon} \\ \text{profundidad de penetración } \delta = \frac{1}{\beta} \end{cases}$$

Propagación en dieléctricos sin pérdidas

$$\begin{cases} \mu = \mu_0 \\ \sigma = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \alpha = k\sqrt{\epsilon_r} \\ \lambda = \frac{2\pi}{\alpha} = \frac{2\pi}{k\sqrt{\epsilon_r}} \\ \beta = 0 \Rightarrow \delta = \infty \end{cases}^8$$

Por tanto, la profundidad de penetración en dieléctricos sin pérdidas es infinita.

Se podría demostrar (expresando la densidad de energía media) que la misma que ocurre en el vacío, la energía almacenada se reparte por igual entre el campo eléctrico y el campo magnético.

Propagación en buenos conductores

$$\begin{cases} \epsilon = \epsilon_0 \\ \mu = \mu_0 \\ \sigma \text{ real} \end{cases}$$

En un buen conductor la **corriente de conducción** es mucho mayor que la **corriente de desplazamiento**:

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \gg \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \omega \cdot \epsilon_0 \cdot \vec{E} \Rightarrow \sigma \gg \omega \cdot \epsilon_0$$

Por tanto, las conclusiones más importantes son:

$$\begin{cases} \alpha = \beta = \frac{1}{\delta} \\ \delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu_0 \cdot \sigma}} \end{cases}$$

⁸ $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ es el número de onda real (en el vacío)

Ahora, la profundidad de penetración disminuye con la frecuencia. Pero además la condición de buen conductor también depende de la frecuencia.

Los campos que se propagan en un buen conductor decaen a $1/e \cong 0,37$ de su valor cuando recorren δ . Al recorrer 10δ los campos decaen a, aproximadamente, $4,5 \times 10^{-5}$ de su valor.

A medida que aumenta la frecuencia, la relación $\frac{\sigma}{\omega \cdot \varepsilon}$ disminuye y el material deja de comportarse progresivamente como un buen conductor. Además los valores de σ y ε varían con la frecuencia.

Un ejemplo interesante es el agua de mar que, a bajas frecuencias se comporta como un conductor y a frecuencias UHF y próximas a microondas se comporta como un dieléctrico con pérdidas moderadas:

$$\begin{aligned}\sigma &= 4 \Omega^{-1} m^{-1} \\ \varepsilon_r &= 80 \\ \frac{\sigma}{\omega \cdot \varepsilon} &= \frac{9 \times 10^8}{f(\text{Hz})}\end{aligned}$$

En la gráfica se muestra la variación de $\frac{\sigma}{\omega \cdot \varepsilon}$ en escala log log, frente a la frecuencia.

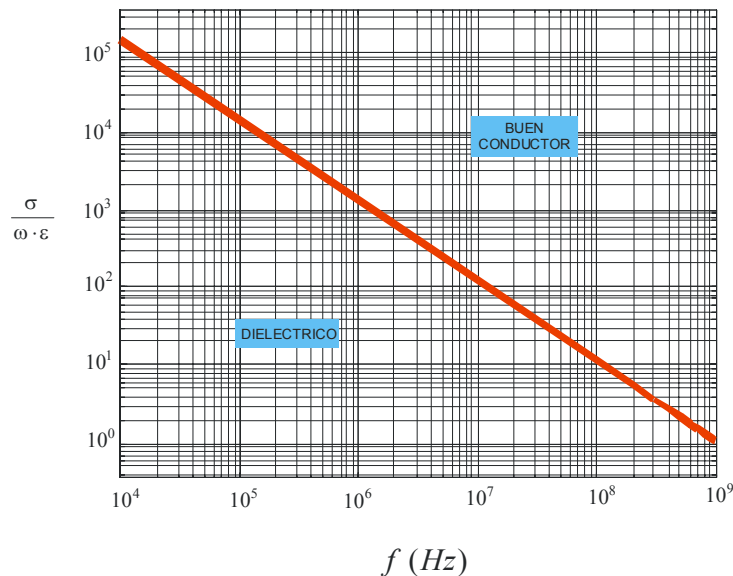


FIG. 11 Comportamiento conductor/dieléctrico versus frecuencia

Se observa que para $f > 100 \text{ MHz}$ el agua de mar comienza a dejar de ser buen conductor y para $f > 1 \text{ GHz}$ ya se comporta como dieléctrico, aunque con pérdidas.

Al contrario de lo que ocurre en el vacío o en dieléctricos sin pérdidas, en buenos conductores el término de densidad de energía media asociado al campo magnético es mucho mayor que el término asociado al campo eléctrico. **La energía de una onda que se propaga en un buen conductor es fundamentalmente magnética.** Ello da lugar a corrientes parásitas o de Foucault que están asociadas a pérdidas por efecto Joule y es el mecanismo de funcionamiento de los blindajes metálicos a alta frecuencia. También este fenómeno tiene gran importancia el estudiar la respuesta biológica de los seres vivos a los campos electromagnéticos.

El cuerpo humano se puede considerar (simplificando bastante) como un conductor de conductividad media-alta, debido a su gran contenido en agua y electrolitos. Por ello hay una profundidad de penetración dependiente de la frecuencia que hace que, excepto para frecuencia extremadamente bajas (por debajo de los 30 Hz), la penetración del campo eléctrico es despreciable. La mayor parte de la energía es magnética, traduciéndose en corrientes de Foucault y otros efectos. Este es el motivo de que la mayoría de los estudios se centran en el efecto de los campos magnéticos sobre la salud.

En el caso de tejidos animales sometidos a radiación de radio frecuencia (RF) o microondas (MO), suelen darse, en mayor o menor grado, los tres fenómenos de reflexión, transmisión y absorción.

En lo referente a la absorción de energía por el cuerpo humano, los campos EM pueden dividirse en cuatro rangos (Durney 1985):

- ✚ Frecuencias a las cuales la absorción en el tronco decrece rápidamente a medida que decrece la frecuencia.
- ✚ Frecuencias a las cuales puede ocurrir absorción relativamente alta en el cuerpo entero, y aún valores mayores si se consideran resonancias parciales (por ejemplo, en la cabeza).
- ✚ Frecuencias a las cuales ocurre absorción local.
- ✚ Frecuencias a las que la absorción de energía ocurre primariamente sobre la superficie corporal (Tabla 1).

BANDA SEGÚN LAS CARACTERÍSTICAS DE ABSORCIÓN	FRECUENCIA MHz	PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN cm	
		Músculos, piel y tejidos con alto contenido en agua	Grasa, huesos y tejidos con bajo contenido en agua
$f < 30$ MHz La absorción en el tronco decrece rápidamente con la frecuencia. Absorción significativa puede ocurrir en cuello y piernas.	1	91,30	-
	10	21,60	-
	27,12	14,30	150,00
$30 \text{ MHz} < f < 400 \text{ MHz}$ Absorción alta debido a resonancias del cuerpo entero (70 MHz) e incluso más altas en partes del cuerpo, como la cabeza, por ej. (400 MHz)	40,68	11,20	118,0
	100	6,66	60,40
	200	4,79	39,20
	300	3,89	32,10
$400 \text{ MHz} < f < 2000 \text{ MHz}$ Absorción localizada por resonancias o por enfoque quasi-óptico del campo E.M. incidente	433	3,57	26,20
	750	3,18	23,00
	915	3,04	17,70
	1500	2,42	13,90
$3 \text{ GHz} < f < 300 \text{ GHz}$ La energía se disipa en la superficie del cuerpo de forma similar a las radiaciones infrarrojas	2450	1,70	11,20
	3000	1,61	9,74
	5000	2,78	6,67
	5300	0,72	5,24
	8000	0,41	4,61
	10000	0,34	3,39

TABLA 1. Absorción de RF y MO en el cuerpo humano

15. REGIONES DE CAMPO CERCANO Y DE CAMPO LEJANO

Hasta ahora se han analizado las soluciones de las Ecuaciones de Maxwell en un recinto sin fuentes de campo, lo que equivale a suponer que las fuentes se hallaban fuera del recinto de integración.

El problema de la radiación consiste en resolver las Ecuaciones de Maxwell en un recinto con fuentes de campo –por simplificar, el vacío–.

Suelen distinguirse tres regiones alrededor de una antena radiante según el comportamiento de los campos, aunque no hay fronteras definidas, sino un paso gradual de una zona a otra.

✚ Región de **campo cercano reactivo, cuasi-estático o de inducción**. En esta zona los campos dependen de forma cuasi-estacionaria de la distribución de cargas y corrientes en el sistema radiante. En ella, el transporte de energía –en valor medio temporal– es nulo, aunque hay valores relevantes de campo en la proximidad del emisor. Durante la mitad de un ciclo la potencia se irradia desde la antena almacenándose en el campo cercano y, durante la segunda mitad del ciclo la potencia regresa desde el campo cercano a la antena. Los campos varían con la distancia como $\frac{1}{r^3}$ y la intensidad de radiación como $\frac{1}{r^6}$. Suele aceptarse como frontera para el campo cercano reactivo:

$$r \leq r_1 = 0,62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$$

Siendo D la máxima dimensión lineal de la antena y λ la longitud de onda.

En la proximidad del elemento radiante, se desconocen la fase y la relación existente entre \vec{E} y \vec{H} . Por tanto, será necesario medir estos campos por separado, para tener definido el campo EM.

✚ Región de **campo cercano radiante o de Fresnel**. Es una región intermedia entre la de campo de inducción y la de campo de radiación (que sí transporta potencia media). En esta zona predominan los campos de radiación. La distribución angular de los campos (diagrama de radiación) es función de la distancia a la antena. Para sistemas pequeños frente a la longitud de onda, como el dipolo eléctrico, esta región puede no existir. Convencionalmente, para muchos sistemas esta región se extiende entre:

$$r_1 = 0,62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \leq r \leq \frac{2D^2}{\lambda} = r_2$$

✚ Región de **campo lejano de radiación** o de **Fraunhofer**. Aquí, los campos de radiación son una onda esférica elemental que transportan potencia media. El diagrama de radiación (distribución angular del campo) es independiente de la distancia. Los campos eléctrico y magnético son perpendiculares entre sí y a la dirección radial de propagación, y están relacionados entre sí por la impedancia intrínseca del vacío (como las ondas esféricas elementales). Dependen de la distancia como $\frac{1}{r}$. La densidad de potencia varía como $\frac{1}{r^2}$. **En esta zona basta con realizar una sola medición de E , H o S** (campo eléctrico, campo magnético o densidad de potencia) y calcular, mediante fórmulas, las otras magnitudes restantes. Suele aceptarse que la hipótesis de campo lejano se cumple cuando se verifican las tres condiciones:

$$\begin{aligned} r &\geq r_2 = \frac{2D^2}{\lambda} \\ r &\gg D \\ r &\gg \lambda \end{aligned}$$

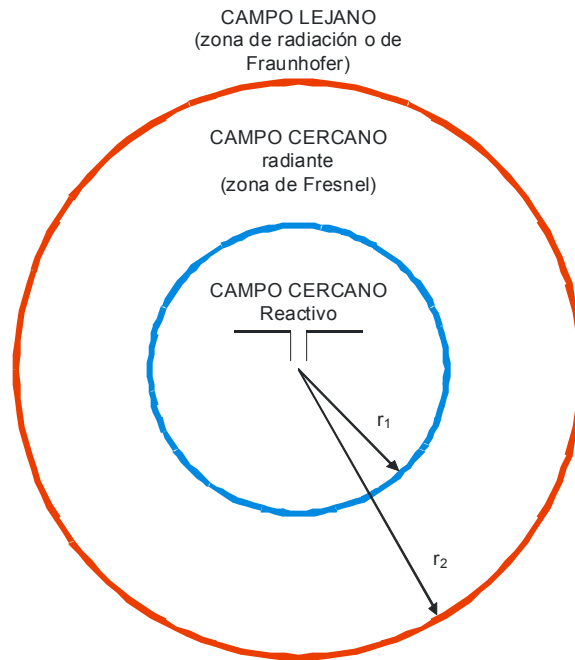


FIG. 12 Campos cercanos y campos lejanos

Otra forma –más grosera– de delimitar la zona de campo lejano, es efectuar medidas, dependiendo de la frecuencia, a más de una longitud de onda de la fuente (preferible a más del triple).

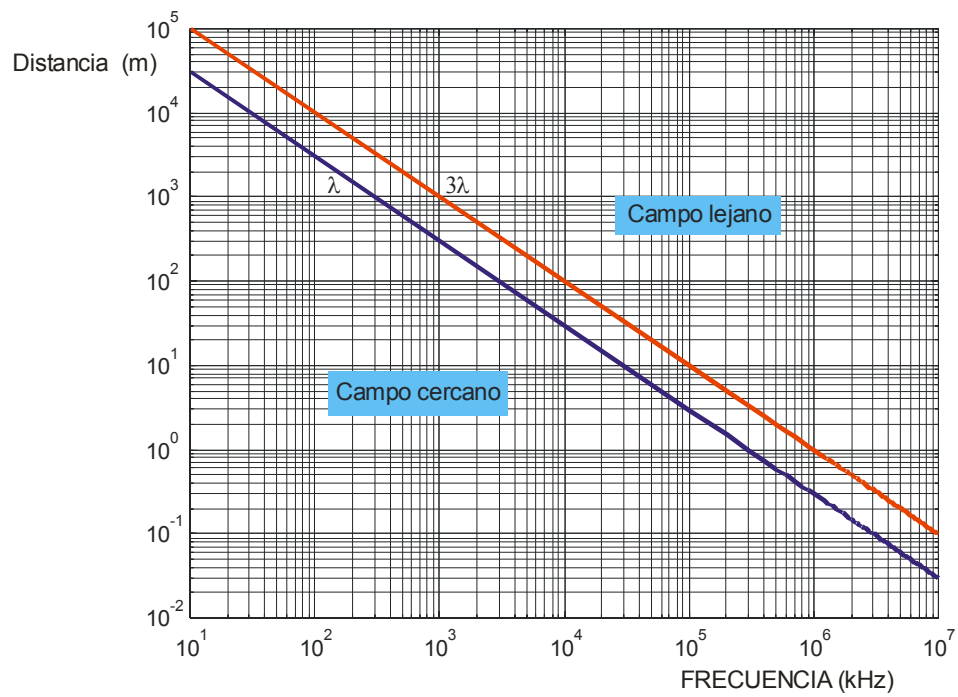


FIG. 13 Campo lejano

16. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

	f	λ	E
γ	300 EHz	1 pm	1,24 MeV
HX	30 EHz	10 pm	124 keV
SX	3 EHz	100 pm	12,4 keV
EUV	300 PHz	1 nm	1,24 keV
	30 PHz	10 nm	124 eV
NUV	3 PHz	100 nm	12,4 eV
NIR	300 THz	1 μm	1,24 eV
MIR	30 THz	10 μm	124 meV
FIR	3 THz	100 μm	12,4 meV
EHF	300 GHz	1 mm	1,24 meV
SHF	30 GHz	1 cm	124 μeV
UHF	3 GHz	1 dm	12,4 μeV
VHF	300 MHz	1 m	1,24 μeV
HF	30 MHz	1 dam	124 neV
MF	3 MHz	1 hm	12,4 neV
LF	300 kHz	1 km	1,24 neV
VLf	30 kHz	10 km	124 peV
VF	3 kHz	100 km	12,4 peV
ELF	300 Hz	1 Mm	1,24 peV
	30 Hz	10 Mm	124 feV

TABLA 2. Espectro electromagnético

El término **espectro electromagnético** se refiere al conjunto de las posibles longitudes de onda o de frecuencias de la radiación EM. La longitud de onda λ , la frecuencia f y la energía E de un fotón están relacionadas por las ecuaciones:

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

$$E = h \cdot f$$

Las constantes c y h son, respectivamente, la velocidad de la luz en el vacío y la constante de Planck.

$$c \cong 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$$

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = 4,1 \text{ } \mu\text{eV/GHz}$$

En la tabla, el significado de los acrónimos es:

γ	Rayos gamma
HX	Rayos X "duros" (Hard X-rays)
SX	Rayos X "blandos" (Soft X-rays)
EUV	Ultravioleta lejano (Extreme UltraViolet)
NUV	Ultravioleta cercano (Near UltraViolet)
NIR	Infrarrojo cercano (Near InfraRed)
MIR	Infrarrojo medio (Moderate InfraRed)
FIR	Infrarrojo lejano (Far InfraRed)

TABLA 3. Acrónimos en la Tabla 2

En la normativa internacional el espectro asociado a ondas sub-ópticas (radio ondas), se extiende convencionalmente desde 30 Hz a 300 GHz. La International Telecommunications Union (ITU) ha dividido el espectro en bandas como se indica:

Banda	Acrónimo	Rango de frecuencia
Frecuencia extra alta	EHF (microondas)	30 – 300 GHz
Frecuencia súper alta	SHF (microondas)	3 – 30 GHz
Frecuencia ultra alta	UHF	300 – 3000 MHz
Frecuencia muy alta	VHF	30 – 300 MHz
Frecuencia alta	HF	3 – 30 MHz
Frecuencia media	MF	300 – 3000 KHz
Frecuencia baja	LF	30 – 300 KHz
Frecuencia muy baja	VLF	3 – 30 KHz
Frecuencia de voz	VF	300 – 3000 Hz
Frecuencia extremadamente baja	ELF	30 – 300 Hz

TABLA 4. Bandas de frecuencia según la ITU

Las frecuencias por debajo de 30 Hz no se consideran aptas para las comunicaciones, aunque hay muchos efectos naturales (campo magnético terrestre, campos EM atmosféricos, subterráneos, etc.) y artificiales (imanes permanentes, electroimanes, etc.) que producen campos estáticos o de frecuencias por debajo de los 30 Hz .

Aunque en la Tabla 2 se indican fronteras perfectamente delimitadas, a menudo hay solapes entre tipos contiguos de radiaciones electromagnéticas. Por ejemplo, algunos

rayos gamma de baja energía tienen longitud de onda mayor (frecuencia menor) que algunos rayos X de alta energía. La explicación es simple, los rayos gamma son radiaciones EM, de gran energía, esencialmente idénticos a los rayos X. La diferencia estriba más en la fuente de radiación que en la longitud de onda. Mientras que los rayos gamma proceden de la desintegración radioactiva de un núcleo atómico, los rayos X se deben a transiciones electrónicas que tienen lugar fuera del núcleo. Generalmente las transiciones nucleares son mucho más energéticas que las transiciones electrónicas.

En la radiación cósmica ⁹ hay ondas EM de frecuencias mayores que los rayos gamma, aunque también existen **rayos cósmicos** con frecuencias que se insertan en la parte alta de los rayos gamma.

En términos de posibles **efectos biológicos**, el espectro electromagnético puede dividirse en dos regiones:

- ✚ La **región ionizante**, donde puede haber un daño químico directo. A muy altas frecuencias, características del ultravioleta lejano y rayos X, los fotones del campo EM tienen energía suficiente para romper enlaces químicos (ruptura conocida como **ionización**).
- ✚ La **región no ionizante**, donde puede haber excitación electrónica, calentamiento por corrientes inducidas o alteración de las reacciones químicas normales. Esta zona se corresponde con frecuencias más bajas, características del ultravioleta cercano, luz visible, infrarrojo y radio ondas.

La frontera entre ambas regiones se coloca, convencionalmente, en energías de 12,4 eV:

$$f = \frac{E}{h} = \frac{12,4 \times 0,1602 \times 10^{-18}}{6,63 \times 10^{-34}} = 0,2996 \times 10^{16} \text{ Hz} \approx 3 \text{ PHz}$$

Esta frontera cae en el ultravioleta lejano (EUV).

Los **Rayos Gamma** tienen longitudes de onda más cortas que los R-X. Estos son los fotones más energéticos. Aunque no tienen un límite inferior claro para su longitud de onda, suele aceptarse que se encuentran en el rango de frecuencias:

$$3 \text{ EHz} < f < 30 \text{ ZHz}$$

Se usan en astronomía para estudiar objetos o regiones de alta energía y, en general, en investigación de Física de alta energía. También como radioterapia de algunos tipos de cáncer, con la conocida "bomba de cobalto".¹⁰

⁹ Partículas (protones, neutrones, etc.) altamente energéticas, procedentes del espacio exterior.

¹⁰ Dispositivo generador de rayos gamma mediante el isótopo Co-60.

Los **Rayos X** se usan para ver a través de algunos objetos y no de otros, aprovechando la diferencia de absorción entre materia distinta (diagnósticos médicos, por ejemplo). También en Física de alta energía y astronomía – agujeros negros y estrellas de neutrones emiten R-X, permitiendo así su estudio-. Su frecuencia, se acepta convencionalmente:

$$30 \text{ PHz} < f < 50 \text{ EHz}$$

Los **Rayos Ultravioleta** son una radiación EM cuya longitud de onda es más corta que el final del violeta del espectro visible. Esta parte del espectro se corresponde con frecuencias:

$$750 \text{ THz} < f < 300 \text{ PHz}$$

El sol es una fuente importantísima de radiación ultravioleta. Este tipo de radiación, creada artificialmente tiene aplicaciones como, esterilización de instrumental y determinado equipamiento, lámparas germicidas para piscinas u otros ambientes¹¹, lámparas de bronceado¹², etc.

La **Luz Visible**, se extiende en el espectro EM, desde los 780 nm de longitud de onda (frontera entre el rojo y el infrarrojo), hasta los 400 nm (extremo superior del violeta), lo que traducido a frecuencias es:

$$385 \text{ THz} < f < 750 \text{ THz}$$

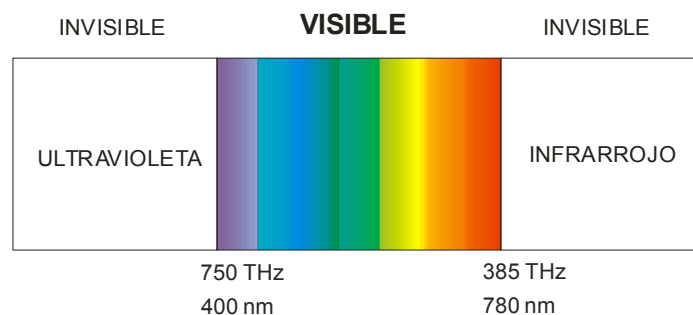


FIG. 14 Luz visible

El **Infrarrojo** cubre la parte del espectro desde, aproximadamente, 300 GHz (1 mm) a 385 THz (780 nm). Se divide en tres regiones:

¹¹ Suelen trabajar a una longitud de onda de 254 nm (1,2 PHz).

¹² La longitud de onda, por normativa, debe ser mayor que 295 nm (1 PHz).

- **Infrarrojo lejano**

$$300 \text{ GHz} < f < 30 \text{ THz}$$

La parte inferior de este rango puede ser calificada como **microondas**.

- **Infrarrojo medio**

$$30 \text{ THz} < f < 120 \text{ THz}$$

- **Infrarrojo cercano**

$$120 \text{ THz} < f < 385 \text{ THz}$$

Aplicaciones típicas de los rayos infrarrojos se encuentran en astronomía, industria, medicina, etc.

Los **láseres**¹³ son radiaciones EM en el rango, generalmente, del espectro visible (láser He-Ne de 638 nm, láser Nd-YAG de 1,06 μm , etc.) aunque también se pueden localizar en infrarrojo (láser CO₂ de 30 μm) e incluso en el ultravioleta.

Las características específicas de la luz láser es que se trata de una luz **monocromática**, **coherente** y **colimada**. Las aplicaciones son innumerables. En Odontología y otras especialidades médico-quirúrgicas, para lectores-grabadores de CD's y DVD's, etc.

Las **Radio ondas** o **Radio Frecuencia** (RF) se refieren a la porción del espectro EM en el que las ondas EM pueden ser generadas por corrientes alternas que alimentan a una antena.

Banda	Acrónimo	Banda ITU	Frecuencia	Longitud de onda
Frecuencia extremadamente baja	ELF	2	3-30 Hz	100000-10000 km
Frecuencia súper baja	SLF	2	30-300 Hz	10000-1000 km
Frecuencia ultra baja	ULF	3	300-3000 Hz	1000-100 km
Frecuencia muy baja	VLF	4	3-30 kHz	100-10 km
Frecuencia baja	LF	5	30-300 kHz	10-1 km
Frecuencia media	MF	6	300-3000 kHz	1 km-100 m
Frecuencia alta	HF	7	3-30 MHz	100-10 m
Frecuencia muy alta	VHF	8	30-300 MHz	10-1 m
Frecuencia ultra alta	UHF	9	300-3000 MHz	1m-100 mm
Frecuencia súper alta	SHF	10	3-30 GHz	100-10 mm
Frecuencia extremadamente alta	EHF	11	30-300 GHz	10-1 mm

TABLA 5. Bandas de Radio Frecuencia

¹³ Láser es el acrónimo de "Light Amplification by Stimulated Emisión of Radiation".

Las radio ondas se usan para transmisión de datos, vía modulación, televisión, teléfonos móviles, redes inalámbricas, emisoras de radiodifusión comerciales, de radio-aficionados, hornos microondas, etc.

Las bandas ELF, SLF, ULF y VLF, en conjunto, se conocen como **Audio Frecuencia (AF)**.

ELF son usadas por la armada de USA para comunicarse con submarinos sumergidos. La banda VLF también se usa con el mismo propósito pero cuando la nave se encuentra cerca de la superficie (a unos 20 m o menos).

SLF es típica en líneas de transporte y distribución (50 o 60 Hz). 10 KHz es frecuente en radionavegación (banda VLF). Cocinas de inducción trabajan en el rango de 25-40 KHz (bandas VLF-LF).

Las bandas LF (onda larga), MF (onda media), HF (onda corta) y VHF (FM radio y TV), son vulgarmente conocidas como **Radio Frecuencia (RF)**. Además de en radiodifusión, otras aplicaciones son calentamiento por histéresis dieléctrica – soldadura, fusión y reblandecimiento de plásticos- (13,56 MHz - 27,12 MHz - 40,68 MHz), calentamiento por inducción, etc.

UHF, SHF y EHF, popularmente se conocen como **Microondas (MO)**. La telefonía móvil (GSM, DCS y UMTS ¹⁴) opera en esta franja del espectro frecuencial. Otras aplicaciones: hornos microondas (2,45 GHz), radares para control policial de tráfico (10 GHz), radares de aeropuertos (15-100 GHz), Wi-Fi ¹⁵, etc.

¹⁴ Las frecuencias en Europa son, según la tecnología: GSM (Global System for Mobile Communications) 900 MHz. DCS (Digital Cellular Systems) 1800 MHz. UMTS (Universal Mobil Telecommunications Systems) 2000 MHz.

¹⁵ de "Wireless Fidelity", es un estándar para redes de área local basado en las especificaciones IEEE802.11. que emplea 2,4 GHz.

17. ASPECTOS BIOLÓGICOS DE LOS CAMPOS EM

La interacción entre una emisión EM y material biológico depende de la frecuencia de la emisión, por lo que los diferentes tipos de radiaciones EM deben ser evaluados de forma individual. A muy altas frecuencias (ultravioleta lejano, rayos X y rayos gamma), los fotones tienen energía suficiente para romper los enlaces químicos. Esta ruptura da lugar al fenómeno de **ionización** que ya se trató en el epígrafe anterior, en el que se hacía una primera clasificación de las **radiaciones EM** del espectro en **ionizantes** y **no ionizantes**.

En la gran mayoría de las situaciones reales los campos EM son de frecuencias dentro del rango de las radiaciones no ionizantes. Sin embargo, como se observa fácilmente en hornos microondas o teléfonos móviles, esta radiación puede producir efectos dañinos por lo que debe evaluarse.

Muchos de los efectos biológicos del ultravioleta cercano, luz visible e infrarrojos dependen también de la energía fotónica, pero está relacionados con la excitación electrónica más que con la ionización y no se producen a frecuencias inferiores al infrarrojo (por debajo de 3×10^{11} Hz). Las radio frecuencias y microondas pueden causar efectos en los tejidos, por la producción de calor. La eficacia con la que una radiación EM puede inducir corrientes eléctricas (corrientes de Foucault) y, por tanto, generar calor, depende de la frecuencia de la emisión y del tamaño y orientación del objeto en el que inciden las radiaciones. A frecuencias inferiores a las utilizadas en la radio AM (1 MHz, aproximadamente) las emisiones electromagnéticas se acoplan débilmente con cuerpos humanos o de animales, por lo que son poco eficientes para producir calor.

En cuanto a los **campos EM estáticos**, **sólo la componente magnética del campo es relevante para posibles efectos sobre la salud**.

Los campos magnéticos asociados a campos estáticos sólo existen cuando hay un flujo de corriente. En cambio, los campos eléctricos asociados a campos estáticos existen siempre que exista tensión, independientemente de que la corriente fluya o no. Los campos magnéticos estáticos son difíciles de apantallar y penetran fácilmente en edificios y personas. Los campos eléctricos estáticos tienen poca capacidad de penetración en la piel o edificios. Por ello, cualquier posible efecto biológico de los campos estáticos se debe a la componente magnética.

La exposición ambiental a campos magnéticos estáticos está dominada por el **campo magnético terrestre**, que varía entre 0,03 y 0,07 mT, dependiendo de la localización. En líneas de transporte de corriente continua –justo debajo-, los campos magnéticos estáticos son del orden de 0,02 mT. Pequeñas fuentes de campos estáticos como imanes de altavoces, hornos microondas, etc., pueden producir campos de 1-10 mT a 1 cm de los polos magnéticos.

La exposición más elevada a un campo magnético estático proviene de los dispositivos para conseguir imágenes por **resonancia magnética (MRI)**, donde los campos están en el rango de 150-2000 mT.

Efectos directos en objetos ferromagnéticos y equipos electrónicos es lo único perceptible por debajo de unos 1000 mT. Realmente no existe un valor umbral para observación de efectos en materiales ferromagnéticos; una brújula puede girar en presencia de campos de unos 0,01 mT, pero se requiere un campo mucho más intenso (por encima de 1 mT) para que objetos ferromagnéticos se muevan de forma peligrosa. Ciertos equipos electrónicos pueden verse afectados por campos bastante débiles, así por ejemplo, un monitor en color de alta resolución puede dar lugar a distorsiones en presencia de campos de 0,1 mT.

Personas expuestas laboralmente a campos estáticos son operadores de unidades de resonancia magnética, personal de instalaciones de aceleradores de partículas y trabajadores de la industria de aluminio (procesos electrolíticos).

Se han realizado relativamente pocos estudios epidemiológicos entre la incidencia del cáncer en trabajadores expuestos a campos magnéticos estáticos. La aplicación de los **criterios de Hill** muestra que la correlación entre campos magnéticos estáticos y cáncer es débil o inexistente.

En resumen, a posibles efectos biológicos, el espectro EM conviene dividirlo en dos regiones:

🚦 **Ionizante:** Rayos gamma, rayos X y ultravioleta lejano.

🚦 **No ionizante**, que puede subdividirse en :

- a) Región de radiación óptica, donde puede darse la excitación electrónica: ultravioleta cercano, luz visible e infrarrojo.
- b) Región donde la longitud de onda es más pequeña que el cuerpo y puede haber efecto térmico por corrientes inducidas: microondas y ondas de radio de alta frecuencia.
- c) Región donde la longitud de onda es mucho mayor que el cuerpo y el calentamiento por corrientes inducidas es despreciable: ondas de radio de baja frecuencia, campos de frecuencia industrial y campos estáticos.

17.1. Organizaciones internacionales

La evaluación de los posibles efectos nocivos de los campos EM en la salud humana es complicada, tanto por la dificultad intrínseca como por las consecuencias económicas, sociales y éticas. Un informe de prestigio equivocado tendría consecuencias graves sobre la sociedad industrial moderna, fuertemente dependiente de dispositivos eléctricos y electrónicos que son imprescindibles en la "sociedad del bienestar".

Por esta razón han ido apareciendo organismos internacionales que se encargan de esta dificultosa evaluación. Citamos algunas:

- **Organización Mundial de la salud (OMS)**. Desde 1996 estableció un programa con el nombre de “Internacional Electromagnetic Fields” (EMF), para estudiar los riesgos a exposiciones a campos EM estáticos y de frecuencias ultra bajas (ELF).
- **International Agency for Research on Cancer (IARC)**. Organismo dependiente de la **OMS** para evaluación del riesgo de los campos ELF en los humanos y sus efectos cancerígenos.
- **International Commission on No-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP)**. Es una organización no gubernamental, reconocida por la OMS, que desde 1992 se considera organismo experto en radiaciones no ionizantes y sus efectos sobre la salud. La mayoría de las normativas internacionales toman como referencia el documento técnico publicado por este organismo: “[GUIDELINES FOR LIMITING EXPOSURE TO TIME-VARYING ELECTRIC, MAGNETIC AND ELECTROMAGNETICS FIELDS \(UP TO 300 GHZ\)](#)” Health Physics, April 1998, Vol.74.
- **Electric and Magnetic Fields Research and Public Information Dissemination Program (EMF-RAPID Program)**. Se creó en USA en 1992 y el Congreso instó al **National Institute of Environmental Health Sciences (NIEHS)** a dirigir un programa de investigación para poner en evidencia los potenciales riesgos de la exposición a campos ELF.

17.2. Estudios epidemiológicos

Se trata de establecer una relación causa-efecto –mediante correlación estadística– entre una enfermedad y los posibles factores o agentes causales.

Por abreviar se propone un ejemplo:

- ✚ Se reúne un grupo de personas que padecen una enfermedad; estos son los **casos**. Se reúne otro grupo de similares características (edad, sexo, etc.) que no tienen la enfermedad; estos son los controles. Por ejemplo, supongamos un conjunto de 500 casos y 500 controles.
- ✚ Se estima el número de casos y de controles que fueron expuestos al agente X (factor de riesgo potencial). En el ejemplo, supongamos que 70 de los 500 casos fueron expuestos a X y 50 de los 500 controles también fueron expuestos. **Las tasas de exposición de casos y de control** son, respectivamente:

$$t_1 = \frac{70}{500 - 70} = 0,16$$

$$t_2 = \frac{50}{500 - 50} = 0,11$$

✚ El **riesgo relativo**¹⁶ es:

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{0,16}{0,11} = 1,45$$

✚ Si el riesgo relativo es del orden de 1 no hay asociación. Si el riesgo relativo es mayor que 1 hay una **asociación positiva** y X puede ser causante de la enfermedad. Si el riesgo relativo es menor que 1 hay una **asociación negativa** y X puede proteger de la enfermedad. En el ejemplo existe una asociación positiva débil, lo que indica que X ha incidido más sobre los casos que sobre los controles.

RIESGO RELATIVO	SIGNIFICADO
<0,4	Protección fuerte
0,40-0,56	Protección moderada
0,57-0,83	Protección débil
0,83-1,19	Indiferente
1,20-1,74	Riesgo débil
1,75-2,50	Riesgo moderado
>2,50	Riesgo elevado

TABLA 6. Valores de riesgo relativo

17.3. Criterios de Hill

Para determinar si un agente ambiental, por ejemplo un campo EM, es causante de una enfermedad o contribuye a su desarrollo, existen varios criterios aceptados ampliamente denominados **criterios de Hill**, que se utilizan para evaluar los estudios epidemiológicos y de laboratorio sobre posibles agentes.

- ✚ **Fuerza de la asociación.** Una asociación fuerte es aquella en la que el riesgo relativo es 5 o superior.
- ✚ **Consistencia.** La mayoría de los estudios deben mostrar el mismo incremento de la incidencia del mismo tipo de enfermedad.
- ✚ **Relación dosis-respuesta.** La incidencia de la enfermedad debe aumentar cuando aumenta la exposición.
- ✚ **Evidencia de laboratorio.** Debe existir evidencia experimental que sugiera que la enfermedad está asociada con la exposición.

¹⁶ Realmente, con el estudio analítico de “casos y controles” el parámetro que se obtiene es el “odds ratio”, razón de predominio u oportunidad relativa. El riesgo relativo es el cociente entre la incidencia en expuestos e incidencia en no expuestos (parámetro típico en el “estudio de cohortes”). El odds ratio es un buen estimador del riesgo relativo siempre que la frecuencia de exposición de los sujetos sanos sea similar a la frecuencia de exposición de la población total, lo que ocurre generalmente ya que la mayoría de las enfermedades son, afortunadamente, poco frecuentes.

- ✚ **Mecanismos biológicos plausibles.** Si hay algún dato biológico o mecanismos biofísicos que sugieran que existe una asociación entre el agente y la enfermedad. Cuando se entiende cómo algo causa una enfermedad es mucho más fácil interpretar una epidemiología ambigua.
- ✚ **Coherencia.** Si la asociación entre exposición y enfermedad es consistente con lo que se conoce sobre la biofísica del agente y la biología de la enfermedad.

17.4. Efectos sobre la salud humana

Como ya se ha dicho, en la mayor parte de los casos las radiaciones EM producidas artificialmente están dentro del rango de frecuencias de las radiaciones no ionizantes. Los efectos de estas radiaciones pueden dividirse en:

- ✚ **Efectos térmicos.** Los principales son hipertermia, quemaduras, cataratas y esterilidad. A frecuencias de RF y MO (el extremo alto del espectro EM industrial) se producen corrientes inducidas que pueden producir daño por calentamiento, alterando los procesos bioquímicos fundamentales de las células. En el peor de los escenarios, este calentamiento puede matar células. Si mueren suficientes células se pueden producir quemaduras y, tal vez, otros daños permanentes en los tejidos. En cualquier caso, cuando la cantidad de energía inducida es superior a la generada en procesos corporales normales, pueden esperarse alteraciones en los tejidos y otros efectos. Algunos de estos efectos pueden no representar riesgos para la salud e incluso ser beneficiosos, buscándose intencionadamente en cierto tipo de terapias como síndromes traumatológicos o reumáticos.
- ✚ **Efectos no térmicos.** Los principales son alteraciones celulares, cromosómicas y genéticas; alteraciones del ritmo cardíaco y de la presión arterial; efectos endocrinos; efectos auditivos; efectos hematopoyéticos. En la biología celular el intercambio de iones a través de la membrana es un mecanismo fundamental que pudiera verse alterado por la incidencia de radiaciones EM. A pesar de la gran cantidad de estudios sobre estos efectos no térmicos, por la complejidad de los mecanismos de intercambio celular, no hay una evidencia de su importancia y eventual riesgo.

17.5. Directrices de la ICNIRP

El documento [“GUIDELINES FOR LIMITING EXPOSURE TO TIME-VARYING ELECTRIC, MAGNETIC AND ELECTROMAGNETICS FIELDS \(UP TO 300 GHZ\)”](#) Health Physics, April 1998, Vol.74. de la ICNIRP ha sido, y es, el más influyente en el establecimiento de límites a la exposición a campos EM. Lo que sigue, en su mayor parte, son extractos de esta publicación.

Se presentan dos clases de guía:

✚ **Restricciones básicas.** Las restricciones a la exposición a campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos variables en el tiempo que se basan directamente en los efectos sobre la salud, se denominan “restricciones básicas”. Dependiendo de la frecuencia del campo, las magnitudes físicas usadas para especificar estas restricciones son densidad de corriente (J), tasa de absorción específica de energía (SAR)¹⁷ y densidad de potencia (S). Sólo la densidad de potencia en el aire, fuera del cuerpo, puede medirse en individuos expuestos.

El **SAR** es un parámetro que cuantifica los efectos térmicos en el cuerpo humano de las radiaciones EM con frecuencias en el rango de 100 kHz-10 GHz. Se define como la potencia electromagnética absorbida por el tejido por unidad de masa:

$$SAR = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{dm} \right) = \frac{\sigma \cdot E^2}{\rho} (W \cdot kg^{-1})$$

donde σ y ρ son, respectivamente la conductividad y la densidad del tejido. E es el valor eficaz (rms) del campo eléctrico en el interior del cuerpo que, en general, es mucho menor que en el exterior.

Se establece preventivamente que un aumento de 1° C de la temperatura corporal es el máximo aceptable para evitar efectos adversos para la salud. El consenso generalizado es que un SAR de 4 W/kg, durante más de 6 minutos, promediado en todo el cuerpo, es suficiente para elevar en 1° C la temperatura de los tejidos. Una cantidad inferior a 4 W/kg supone una disipación de calor comparable a una actividad física moderada y, por tanto está dentro de los márgenes de actuación de los mecanismos de termorregulación del cuerpo humano. Se propone un valor máximo admisible (restricción básica) resultante de aplicar un coeficiente de seguridad de 10, i.e., 0,4 W/kg.

En realidad tanto la conductividad como la densidad, en medios no isótropos, no son magnitudes escalares sino tensoriales, por lo que la fórmula más correcta es:

$$SAR = \frac{\sigma_x}{\rho_x} E_x^2 + \frac{\sigma_y}{\rho_y} E_y^2 + \frac{\sigma_z}{\rho_z} E_z^2$$

donde E_x es el valor rms de la componente x del campo eléctrico monocromático, σ_x la componente correspondiente de la conductividad, etc.

Las propiedades eléctricas σ_x y ϵ_r , dependen de la frecuencia y, naturalmente del tipo de tejido:

¹⁷ De “Specific Absorption Rate”.

TIPO DE TEJIDO	DENSIDAD ρ (kg/m ³)	CONDUCTIVIDAD σ (S m ⁻¹)	PERMITIVIDAD RELATIVA ϵ_r
grasa, hueso	1850	0,0508	9,67
músculo	1070	1,26	59,0
nervio, cerebro	1030	1,05	52,7
ojos	1000	1,9	70,0
sangre	1000	1,18	62,0

TABLA 7. Parámetros de tejidos humanos a 900 MHz

TIPO DE TEJIDO	DENSIDAD ρ (kg/m ³)	CONDUCTIVIDAD σ (S m ⁻¹)	PERMITIVIDAD RELATIVA ϵ_r
grasa, hueso	1850	0,105	7,75
músculo	1070	2,00	55,3
nervio, cerebro	1030	1,65	46,0
ojos	1000	2,20	67,5
sangre	1000	1,25	62,3

TABLA 8. Parámetros de tejidos humanos a 1800 MHz

✚ **Niveles de referencia.** Estos niveles de proveen para propósitos de evaluación práctica de la exposición para determinar si es probable que las restricciones básicas se excedan. Algunos niveles de referencia se derivan de las restricciones básicas usando técnicas de medición y/o computacionales, y otros se dirigen a la percepción y efectos indirectos adversos de la exposición a campos EM. Las cantidades derivadas son: intensidad de campo eléctrico E , intensidad de campo magnético (H), densidad de flujo magnético (B), densidad de potencia (S) y las corrientes que fluyen por los miembros (I_L). Las cantidades que se dirigen a la percepción y otros efectos indirectos son: la corriente de contacto (I_C) y, para campos pulsantes, la absorción específica de energía (SA^{18}). En cualquier situación de exposición particular, valores medidos o calculados de cualquiera de estas cantidades pueden compararse con el apropiado nivel de referencia. El cumplimiento de los niveles de referencia asegurará el cumplimiento de la relevante restricción básica. Si el valor medido o calculado excede el nivel de referencia, no necesariamente se sigue que se excederá la restricción básica. Sin embargo, cuando un nivel de referencia se excede es necesario probar el cumplimiento de la restricción básica y determinar si son necesarias medidas adicionales de protección.

¹⁸ La SA considera energía por unidad de masa, en lugar de potencia por unidad de masa como la SAR. [SA]=J/kg.

En la zona de campo cercano es necesario conocer los campos E y H (o B), mientras que en la región de campo lejano, se supone que la radiación se comporta como una onda plana, de manera que el conocimiento de la densidad de potencia equivale a conocer los campos E y H .¹⁹

Las **cantidades dosimétricas** usadas en estas directrices, dependiendo del rango de frecuencia y de la forma de onda son:

- Densidad de corriente (J), en el rango de frecuencias de hasta 10 MHz.
- Corriente (I), en el rango de frecuencias de hasta 110 MHz.
- Tasa de absorción específica de energía (SAR), en el rango de frecuencias de 100 KHz a 10 GHz.
- Absorción específica de energía (SA), para campos pulsantes, en el rango de frecuencias de 300 MHz a 10 GHz.
- Densidad de potencia (S), en el rango de frecuencias de 10 GHz a 300 GHz.

En los tejidos, la SAR es proporcional al cuadrado de la intensidad del campo eléctrico interior. El valor promedio de la SAR y su distribución pueden ser estudiados o calculados con mediciones de laboratorio. Los **valores de la SAR** dependen de los siguientes factores:

- Parámetros del campo incidente, i.e., frecuencia, intensidad, polarización y configuración objeto-fuente (campo cercano o lejano).
- Las características del cuerpo expuesto, i.e., tamaño y geometría interna y externa, propiedades dieléctricas de los diferentes tejidos.
- Efectos de puesta a tierra y objetos que pudieran provocar reflexión de objetos del cuerpo expuesto en condiciones de campo cercano.

Cuando la longitud axial del cuerpo humano es paralela al vector campo eléctrico²⁰ y bajo condiciones de exposición de onda plana (i.e., exposición en condiciones de campo lejano), la SAR en el cuerpo entero alcanza valores máximos. La cantidad de energía absorbida depende de diversos factores, incluyendo el tamaño del cuerpo expuesto. Si el cuerpo no está conectado a tierra, hay una frecuencia de absorción resonante cercana a los 70 MHz (ver Tabla 1). Par individuos más altos la frecuencia de absorción resonante es algo menor, y para adultos más bajos, niños e individuos sentados puede exceder los 100 MHz. Los valores de los niveles de referencia de campo eléctrico se basan en la dependencia de la frecuencia de la absorción del cuerpo humano. En individuos conectados a tierra, las frecuencias de resonancia son menores en un factor de 2.

Para algunos dispositivos que operan a frecuencias por encima de los 10 MHz – calentadores por histéresis dieléctrica, teléfonos móviles-, la exposición humana puede ocurrir bajo condiciones de campo cercano. En estas condiciones la dependencia respecto a la frecuencia de la absorción de energía es muy diferente a la

¹⁹ Para una onda plana: $S = \frac{E_{rms}^2}{\eta_0} = \eta_0 H_{rms}^2 = E_{rms} \cdot H_{rms}$

²⁰ La polarización vertical es norma en la telefonía móvil.

descrita bajo condiciones de campo lejano. Estudios recientes (Kuster & Balzano 1992, Dimbylow & Mann 1994, Jokela 1994, Gandhi 1995, y otros) han demostrado que con fuentes de radiación EM como teléfonos móviles, walkie-talkies, calentadores dieléctricos, etc., la exposición a campos cercanos puede resultar en una elevada SAR local (p. ej., en cabeza, muñecas y tobillos) y que los valores globales y locales de la SAR dependen fuertemente de la distancia que separa la fuente del cuerpo.

Los **mecanismos de acoplamiento** entre los campos EM y el cuerpo se dividen en:

✚ **Mecanismos de acoplamiento directo.** Hay tres tipos de acoplamiento básicos establecidos a través de los cuales los campos eléctrico y magnético variables en el tiempo interaccionan directamente con la materia viva:

- **Acoplamiento a campos eléctricos de baja frecuencia.** Los efectos son flujo de carga eléctrica (corriente eléctrica), formación de dipolos eléctricos y reorientación de dipolos ya existentes. La importancia de estos efectos depende de los valores de conductividad y permitividad, que dependen del tipo de tejido y de la frecuencia.
- **Acoplamiento a campos magnéticos de baja frecuencia.** El resultado son campos eléctricos inducidos y circulación de corrientes eléctricas. Las magnitudes del campo inducido y la densidad de corriente son proporcionales al radio del lazo, conductividad del tejido y magnitud y tasa de variación de la inducción magnética.
- **Absorción de la energía de campos EM.** La exposición a campos EM de baja frecuencia da lugar a una absorción de energía despreciable y ninguna elevación de la temperatura corporal observable. Sin embargo, por encima de los 100 KHz la elevación de temperatura por una absorción significativa son posibles. En general, la exposición a un campo EM uniforme (onda plana) da lugar a una distribución de energía altamente no uniforme en el cuerpo humano, que debe evaluarse por medición y cálculo dosimétrico (ver Tabla 1, Durney 1985).

✚ **Mecanismos de acoplamiento indirecto.** Hay dos mecanismos de acoplamiento indirecto:

- **Corrientes de contacto,** que resultan cuando el cuerpo humano se pone en contacto con un objeto a diferente potencial eléctrico.
- **Acoplamiento de un campo EM a dispositivos médicos** usados por o implantados en un individuo.

18. ANTENAS

Una antena es un dispositivo formado por un conjunto de conductores recorridos por una corriente variable en el tiempo que, conectado a un generador es capaz de radiar ondas EM, -o que conectado a una impedancia es capaz de recibir ondas EM procedentes de una fuente lejana. Es pues aquella parte del sistema transmisor –o receptor- que actúa como interfase entre éste y el espacio libre –o entre el espacio libre y el sistema receptor.

Los tipos básicos de **radiadores elementales** son:

- ✚ **El dipolo eléctrico oscilante.** Asimilable a un elemento de corriente de dimensiones pequeñas comparadas con la longitud de onda.
- ✚ **El dipolo magnético oscilante.** Espira de corriente de dimensiones pequeñas frente a la longitud de onda.
- ✚ La ranura o **abertura radiante.**

18.1. Tipos de antenas

Se pueden clasificar atendiendo a diferentes criterios:

✚ Según el **modo de radiación:**

- Dipolo eléctrico.
- Dipolo magnético²¹.
- Abertura radiante.

✚ Según su **comportamiento en frecuencia:**

- De banda estrecha.
- De banda ancha.

✚ Según su **comportamiento direccional:**

- Antenas direccionales o sectoriales.
- Antenas omnidireccionales.

✚ Según el **número de radiadores:**

- Con un solo elemento radiante.
- Arreglos o redes de elementos radiantes.

²¹ Los dipolos eléctrico y magnético se conocen como "antenas de elemento de corriente".

18.1.1. EL DIPOLO ELÉCTRICO

Para el caso (ideal) de un hilo muy corto que lleva una corriente armónica uniforme:

$$i(t) = I_0 e^{j\omega t}$$

se demuestra que los campos de radiación (en coordenadas esféricas) son:

$$\begin{aligned} \vec{E}(\vec{r}, t) &= E_r(\vec{r}, t) \cdot \hat{r} + E_\theta(\vec{r}, t) \cdot \hat{\theta} \\ \vec{H}(\vec{r}, t) &= H_r(\vec{r}, t) \cdot \hat{r} + H_\phi(\vec{r}, t) \cdot \hat{\phi} \end{aligned}$$

que teniendo en cuenta, exclusivamente, los términos de radiación (condiciones de campo lejano), se expresan:

$$\begin{aligned} \vec{E}(\vec{r}, t) &= E_\theta \cdot \hat{\theta} = \frac{I_0 L \eta_0}{2 \lambda r} \text{sen}(kr - \omega t) \cdot \text{sen} \theta \cdot \hat{\theta} \\ \vec{H}(\vec{r}, t) &= H_\phi \cdot \hat{\phi} = \frac{I_0 L}{2 \lambda r} \text{sen}(kr - \omega t) \cdot \text{sen} \theta \cdot \hat{\phi} \end{aligned}$$

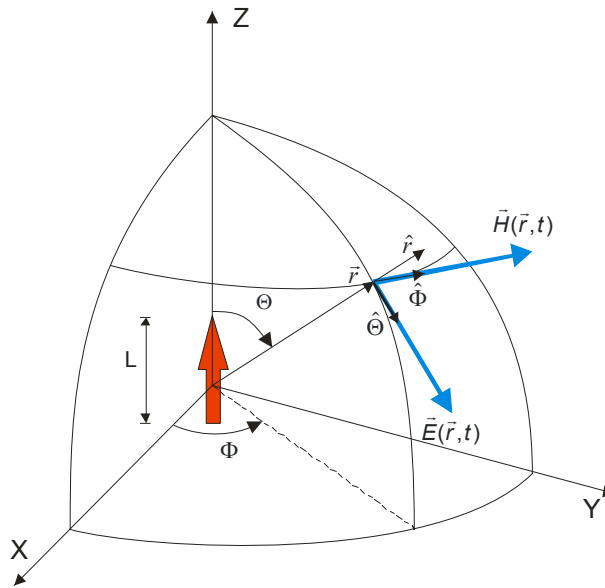


FIG. 15 Dipolo eléctrico corto

Se ve que los términos de radiación dependen de la distancia como $1/r$, son perpendiculares entre sí y a la dirección de propagación radial y la relación entre ellos es la impedancia intrínseca del vacío η_0 . Constituyen pues una onda esférica elemental.

El valor medio del vector de Poynting –cuyo módulo es la densidad de potencia- es:

$$\vec{P}_{medio} = \frac{\eta_0 I_0 \text{sen}^2 \theta}{8r^2} \left(\frac{L}{\lambda}\right)^2 \cdot \hat{r}$$

En un **dipolo real**, la corriente no puede ser constante en toda su longitud (como se ha supuesto hasta ahora), porque debe anularse en los extremos, por lo que debe ser variable a lo largo de la antena (no uniforme). En este caso los campos de radiación son:

$$E = E_\theta = \left[\frac{I_0 L \eta_0}{2 \lambda r} \text{sen}(kr - \omega t) \cdot \text{sen} \theta \right] \cdot \left[\frac{\cos\left(\frac{kL}{2} \cdot \cos \theta\right) - \cos\left(\frac{kL}{2}\right)}{\left(\frac{kL}{2}\right) \cdot \text{sen}^2 \theta} \right]$$

$$H = H_\phi = \frac{E_\theta}{\eta_0}$$

El primer factor coincide con el campo generado por el dipolo corto y el segundo, que recibe el nombre de “factor de interferencia” depende de la longitud del dipolo y de la dirección en el espacio.

18.1.2. EL DIPOLO MAGNÉTICO

El llegar a la solución de un problema con una fuente magnética a partir de un problema similar con una fuente eléctrica, se puede resolver fácilmente aplicando un “principio de dualidad”: reemplazando \vec{E} por \vec{H} y ϵ_0 por μ_0 , y el momento dipolar eléctrico $qL = \frac{I_0 L}{\omega}$ por el momento dipolar magnético $I_0 S$, multiplicado por μ_0 .

De esta forma resulta, para una pequeña espira de corriente, situada en el plano XY, de área S y recorrida por una corriente $i(t) = I_0 e^{j\omega t}$:

$$E = E_\phi = \frac{I_0 S \eta_0 k^2}{4\pi r} \text{sen}(kr - \omega t) \cdot \text{sen} \theta$$

$$H = H_\theta = \frac{I_0 S k^2}{4\pi r} \text{sen}(kr - \omega t) \cdot \text{sen} \theta$$

y el valor medio del vector de Poynting:

$$\vec{P}_{\text{medio}} = \frac{I_0^2 S^2 k^4}{32\pi^2 r^2} \text{sen}^2\theta \cdot \hat{r}$$

Los campos de radiación son normales entre sí y a la dirección radial de propagación, y se relacionan a través de la impedancia intrínseca del vacío η_0 .

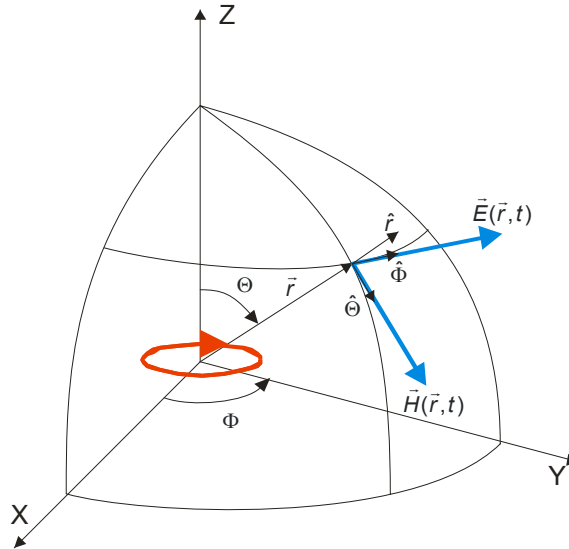


FIG. 16 Dipolo magnético elemental

18.1.3. RANURA O ABERTURA RADIANTE

Las antenas de abertura aprovechan la posibilidad de la radiación emitida por agujeros o ranuras practicadas en superficies conductoras. Se usan en UHF y frecuencias mayores, cuando se precisa alta ganancia. Se basan en el principio de Huygens, según el cual cada punto del frente de onda de una onda EM, se puede considerar como una fuente secundaria de emisión de ondas esféricas. La superposición coherente de los campos emitidos por estos centros secundarios define el nuevo frente de onda.

La antena bipolar eléctrica o dipolo largo, es una antena resonante porque en el caso ideal de pérdidas nulas se forma sobre ella una onda estacionaria de corriente con nodos en los extremos abiertos. Por ello, la longitud de la antena debe ser un número entero de semilongitudes de onda para satisfacer esta condición. Así sólo se puede alimentar con un conjunto discreto de frecuencias de resonancia. Si se alimenta a la antena con una frecuencia no resonante habrá una fuerte reflexión a la entrada de la antena. La antena bipolar es pues una antena **de banda estrecha**, alrededor de la frecuencia o frecuencias de resonancia. Esta conclusión es válida cuando el conductor que compone la antena es de sección despreciable. En general, el ancho de banda aumenta conforme aumenta la sección del alambre.

En muchas ocasiones el dipolo tiene una sola rama a la que se conecta el generador, cuya otra conexión se hace a tierra. La otra rama se puede considerar como la **imagen** en tierra de la rama real. Así, una rama de $L = \lambda / 4$ equivale a un dipolo de $\lambda / 2$. El monopolo se conoce como “antena látigo” o **antena Marconi** y tienen un cuarto de longitud de onda o un múltiplo impar de éste, con toma de tierra ($\frac{1}{4}$ de onda, media onda, $\frac{5}{8}$ de onda, etc.), muy usada en automóviles, receptores de radio, teléfonos móviles, etc. Para que este sistema sea eficiente la tierra debe aproximarse a la hipótesis de plano conductor perfecto: alta conductividad y debe extenderse varias veces $\lambda / 4$ alrededor del látigo.

El dipolo de media onda, también conocido como “**antena de Hertz**”, es una de las antenas más ampliamente utilizadas para frecuencias por encima de 2 MHz.

Entre las antenas de elementos de corriente –además de los dipolos y monopolos– otras muy utilizadas son la **antena de cuadro** o **antena loop** y la **antena de microcinta** (“microstrip” o “patch”); en ésta los conductores radiantes son un parche metálico encima de un plano de referencia.

Entre las antenas de abertura, las más desarrolladas tecnológicamente son: de bocina, de reflector y de bocina parabólica

18.1.4. ANTENAS DE BANDA ESTRECHA

Emiten eficientemente sólo en un conjunto discreto de frecuencias –usualmente una sola–. Son las llamadas antenas “resonantes”, en las que las distribuciones de corriente y tensión a lo largo de las mismas son ondas estacionarias, i.e., el perfil de onda no progresa.

18.1.5. ANTENAS DE BANDA ANCHA

Emiten con buena eficiencia en un amplio espectro. Son las antenas “**de onda progresiva**” u onda viajera. La onda de corriente es una onda progresiva que viaja a través de la antena. Como la longitud de onda de la onda viajera no tiene que cumplir ninguna condición en los extremos de la antena, no hay restricción sobre la frecuencia de la corriente de alimentación.

18.1.6. ANTENAS DIRECCIONALES O SECTORIALES

Concentran la radiación en una dirección particular. Se emplean en estaciones base de telefonía celular donde la cobertura sobre un sector se asegura mediante antenas separadas. Los radio enlaces punto a punto (enlaces que comunican la estación base con otros elementos como centrales, controladores, etc.) se benefician de las antenas direccionales. La radiación se dirige hacia el frente de la antena, la cual está ligeramente inclinada (2° a 6°), respecto al horizonte, hacia abajo. Las antenas de las estaciones base son de unos 20 a 30 *cm* de ancho y 1 *m* de alto, montadas sobre torres, a una altura de 15 a 50 *m* sobre el suelo.

La densidad de potencia en un punto del espacio depende de la potencia radiada, direccionalidad de la antena y de la distancia. La potencia radiada por la mayoría de las estaciones base celulares en áreas urbanas está en torno a los 5-10 *W* por canal, o incluso niveles más bajos. La densidad de potencia radiada es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Para una misma distancia fuera de la dirección de máxima radiación, la densidad de potencia decae rápidamente. Por ello, la radiación sobre el suelo, debajo de la antena, es escasa, se incrementa algo al aumentar la distancia y, después disminuye rápidamente al alejarse de la antena.

La radiación de una antena direccional hacia su espalda es unas 200 veces inferior a la radiación en la dirección de máxima radiación.

18.1.7. ANTENAS OMNIDIRECCIONALES

Radian y reciben con igual eficacia en todas las dimensiones horizontales. Los teléfonos móviles y algunas estaciones base requieren un diagrama de radiación omnidireccional.

18.1.8. ANTENAS CON UN ÚNICO ELEMENTO RADIANTE

En este grupo pueden incluirse todas las estudiadas hasta ahora: dipolos, monopolos, de abertura, microcinta, etc.

18.1.9. ANTENAS DE ARREGLOS O REDES DE RADIADORES

Los diagramas de radiación con un solo elemento radiante no siempre satisfacen las necesidades requeridas. Es posible modificar el diagrama de radiación combinando múltiples radiadores y utilizando la interferencia entre los campos emitidos. Es imprescindible que los radiadores emitan de forma “coherente”, i.e., que los campos mantengan una correlación de fase, lo que se logra fácilmente estableciendo una correlación de fase entre las corrientes alimentadoras de las fuentes de RF. En particular, las corrientes alimentadoras pueden estar en fase, denominándose genéricamente a la agrupación de elementos radiantes “**arreglos en fase**”. La mayoría de las antenas en uso en las estaciones base son redes o arreglos.

El diagrama de radiación puede ajustarse o cambiarse electrónicamente, sin necesidad de girar los elementos de la antena. Su aplicación principal es en radares (también en tecnología celular).

Los arreglos de elementos más utilizados son:

- Arreglos verticales colineales. Son esencialmente omnidireccionales en el plano horizontal. La ganancia es, aproximadamente, proporcional al número de elementos.
- Arreglos en plano horizontal. Son direccionales en el plano horizontal. Útiles para sectorización. En este grupo están las conocidas **antena Yagi-Uda** y la **antena log-periódica**.

La antena Yagi-Uda²² está constituida exclusivamente por dipolos. Es usada frecuentemente porque proporciona ganancia y directividad. Tiene un solo elemento activo y otros elementos pasivos (directores y reflectores) por los que circulan corrientes inducidas por el campo generado por el elemento activo. Todos los elementos son paralelos y coplanarios. Los elementos activos radian el campo, los directores lo dirigen y los reflectores lo reflejan. La antena Yagi más simple consta de tres elementos, uno activo, un director y un reflector. Se utiliza ampliamente en recepción de señales de TV. El ancho de banda es pequeño.

En la antena logarítmica-periódica o log-periódica todos los elementos son activos. La localización y longitud de los sucesivos elementos aumenta de uno al siguiente en un factor constante. Su ancho de banda es grande.

18.2. Parámetros fundamentales de las antenas

18.2.1. IMPEDANCIA DE ENTRADA

Es la que la antena emisora presenta al circuito de alimentación, es decir, la relación entre la tensión y la corriente en sus terminales de entrada.

$$\bar{Z}_A = R_A + jX_A = (R_r + R_\Omega) + jX_A$$

R_A Resistencia de la antena

X_A Reactancia de la antena

R_r Resistencia de radiación

R_Ω Resistencia óhmica o resistencia de pérdidas

El **rendimiento** de una antena es el cociente entre la potencia total radiada y la potencia entregada a la antena:

²² Su nombre hace referencia a los ingenieros japoneses que la diseñaron.

$$\eta = \frac{P_{radiada}}{P_{entregada}} = \frac{I^2 R_r}{I^2 R_r + I^2 R_\Omega} = \frac{R_r}{R_r + R_\Omega}$$

18.2.2. DENSIDAD DE POTENCIA RADIADA

Es el promedio temporal del vector de Poynting y representa la potencia media radiada por unidad de área transversal a la dirección de propagación. Las unidades son Wm^{-2} .

En ondas armónicas, utilizando la notación fasorial:

$$\bar{P}_{medio} = \frac{1}{2} \text{Re}\{E \times \bar{H}^*\} = \frac{E_o^2}{2\eta_o} \hat{r} = \frac{E_{rms}^2}{\eta_o} \hat{r} = S \cdot \hat{r}$$

E_o Valor máximo (pico) del campo eléctrico senoidal

E_{rms} Valor eficaz del campo eléctrico

η_o Impedancia intrínseca del vacío

\hat{r} Versor en la dirección de propagación

18.2.3. POTENCIA MEDIA RADIADA

Se calcula mediante el flujo del vector de Poynting a través de una superficie cerrada que contiene a la antena:

$$P_{radiada} = \oint_S \bar{P}_{medio} \cdot d\vec{A}$$

En la región de campo lejano, los campos eléctrico y magnético varían con la distancia como $1/r$ y el vector de Poynting es radial hacia fuera. La superficie cerrada de integración puede ser cualquiera; por conveniencia matemática se elige una esfera centrada con el centro de la antena de radio r .

$$P_{radiada} = \oint_S \bar{P}_{medio} \cdot d\vec{A} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi S r^2 \text{sen}\theta d\theta d\phi \quad ^{23}$$

La **intensidad de radiación** $U(\theta, \phi)$ se define como la potencia radiada por unidad de ángulo sólido:

²³ S es el módulo del valor medio temporal del vector de Poynting, es decir, la densidad de potencia.

$$U(\theta, \phi) = \frac{S(r, \theta, \phi) \cdot dA}{d\Omega} = r^2 \cdot S(r, \theta, \phi) \quad ^{24}$$

$d\Omega$ es el ángulo sólido elemental subtendido por el elemento de área dA :

$$d\Omega = \frac{dA}{r^2} = \frac{r^2 \sin\theta \, d\theta \, d\phi}{r^2} = \sin\theta \, d\theta \, d\phi$$

con lo que la potencia radiada queda:

$$P_{\text{radiada}} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U(\theta, \phi) \cdot d\Omega$$

La **intensidad de radiación media** o **intensidad de radiación isotrópica** se calcula dividiendo la intensidad de radiación por el área de una esfera de radio unidad (4π):

$$U_{\text{medio}} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi U(\theta, \phi) \cdot d\Omega}{4\pi} = \frac{P_{\text{radiada}}}{4\pi}$$

y representa la intensidad de radiación de una fuente puntual ²⁵ que produciría la misma potencia radiada que la antena real.

18.2.4. DIRECTIVIDAD

Es la relación entre la intensidad de radiación en una dirección dada y la intensidad de radiación media. Esto es, el cociente entre la intensidad de radiación en una dirección y la intensidad de radiación de un radiador isotrópico que radiase la misma potencia total.

$$D(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{U_{\text{medio}}} = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{\text{radiada}}} = \frac{4\pi r^2 S(r, \theta, \phi)}{P_{\text{radiada}}} \geq 1$$

La directividad mide el grado de anisotropía de la radiación. Una antena muy directiva concentra su radiación en un ángulo sólido pequeño. La directividad de un radiador isotrópico es la unidad.

²⁴ En el diagrama de radiación "normalizado" de potencia, la función que se representa en 3D es:

$$f(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{U_{\text{max}}} \leq 1$$

²⁵ Una fuente puntual o "**radiador isotrópico**" es un radiador (ideal) que emite de forma isotrópica, es decir, con independencia de la dirección en el espacio.

La **directividad en dB** es:

$$D(\theta, \phi)_{dB} = 10 \log_{10} D(\theta, \phi)$$

La **ganancia directa en la dirección de máxima radiación** es:

$$D_o = D(\theta, \phi)_{\max} = \frac{4\pi}{\Omega_A}$$

donde Ω_A es el **ancho de haz** o área de haz. Mide la anisotropía de la radiación: es menor cuanto más concentrada se halla la radiación en un ángulo sólido pequeño.

La **ganancia de potencia en la dirección de máxima radiación** es:

$$G_o = \eta \cdot D_o$$

η es el rendimiento de la antena: $\eta = \frac{P_{radiada}}{P_{entregada}}$

Si (idealmente) la antena no presenta pérdidas óhmicas, la ganancia coincide con la directividad.

18.2.5. DIAGRAMAS DE RADIACIÓN

Son una representación gráfica de las propiedades direccionales de la radiación de una antena, en función de las coordenadas angulares del espacio (coordenadas esféricas).

Se representan como:

✚ Diagramas de campo (campo eléctrico).

✚ Diagramas de potencia.²⁶

²⁶ En los diagramas normalizados, en escala logarítmica, los diagramas de potencia y de campo coinciden, ya que: $10 \log \frac{U}{U_{\max}} = 20 \log \frac{E}{E_{\max}}$.

Los formatos pueden ser:

✚ Diagramas absolutos. Representación del campo eléctrico o densidad de potencia, para una potencia entregada a la antena y a una distancia constante.

✚ Diagramas relativos o normalizados. Se toma como referencia el valor máximo de la función representada ²⁷.

Las gráficas pueden ser :

✚ Tridimensionales.

✚ Diagramas 2D:

- Curvas de nivel
- Cortes $\theta = cte.$ y $\phi = cte.$

Los diagramas 2D, a su vez, pueden representarse:

- Como gráficas polares.
- En coordenadas cartesianas en escala normal o logarítmica (en dB).

Para antenas directivas y polarización lineal suele bastar con conocer los diagramas en los **planos principales**:

- **Plano E**, también llamado de elevación. Contiene el vector \vec{E} y la dirección de máxima radiación ($\theta = \pi/2$ para un dipolo eléctrico elemental). Es cualquier plano a $\phi = cte.$ (plano vertical).
- **Plano H**, también llamado de azimut. Contiene el vector \vec{H} y la dirección de máxima radiación. Es el plano XY (plano horizontal).

²⁷ Si es un diagrama de potencia, se representa la función $f(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{U_{\max}}$

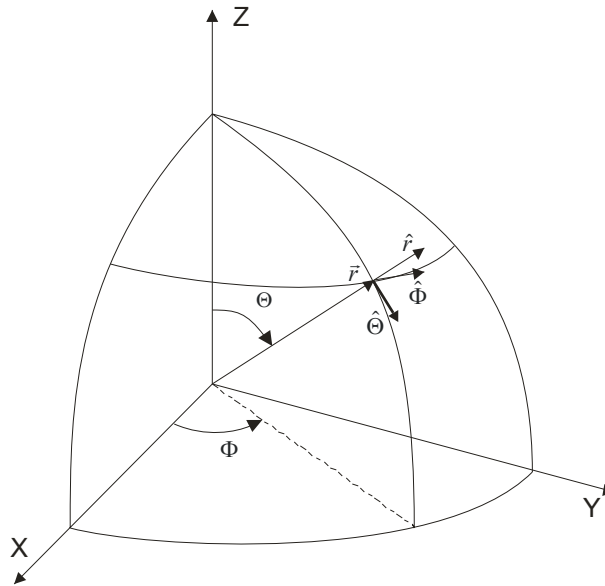


FIG. 17 Coordenadas esféricas

A continuación se muestran algunos diagramas de radiación y el programa MATLAB correspondiente.

```

%DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE UN ARREGLO DE RADIADORES, CONSTITUIDO POR
%DOS RADIADORES ISOTRÓPICOS SEPARADOS UNA DISTANCIA "d".
%LAS CORRIENTES ALIMENTADORAS ESTÁN DESFASADAS "psi"
%El diagrama normalizado de potencia es:
% f(theta,fi)=(cos(pi*(d/lambda)*cos(theta))-psi/2)^2
%CASO1 d/lambda=1 psi=pi/2
theta=linspace(0,pi,100);
fi=linspace(0,2*pi,100);
[THETA,FI]=meshgrid(theta,fi);
%Ecuación de la superficie en coordenadas esféricas
RHO=(cos(pi*cos(THETA)-pi/2)).^2;
%Ecuación de la superficie en forma paramétrica
X=RHO.*sin(THETA).*cos(FI);
Y=RHO.*sin(THETA).*sin(FI);
Z=RHO.*cos(THETA);
%Gráfica3D
subplot(1,2,1);
mesh(X,Y,Z)
%Gráfica polar
subplot(1,2,2);
theta2D=linspace(0,2*pi,100);
rho2D=(cos(pi*cos(theta2D)-pi/2)).^2
polar(theta2D,rho2D,'r-')

```

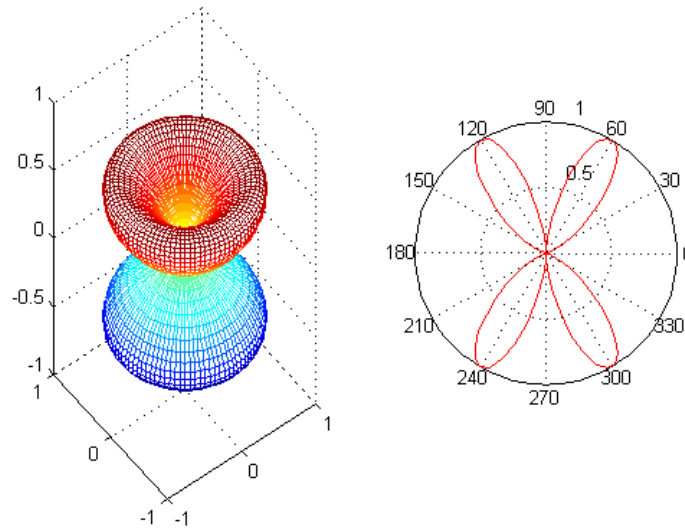



FIG. 18 Diagrama de radiación de un arreglo de dos radiadores isotrópicos separados una distancia $d = \lambda$

```
%DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE UN ARREGLO DE RADIADORES, CONSTITUIDO POR
%DOS RADIADORES ISOTRÓPICOS SEPARADOS UNA DISTANCIA "d".
%LAS CORRIENTES ALIMENTADORAS ESTÁN DESFASADAS "psi"
%El diagrama normalizado de potencia es:
% f(theta,fi)=(cos(pi*(d/lambda)*cos(theta))-psi/2)^2
%CASO5 d/lambda=3 psi=0
theta=linspace(0,pi,1000);
fi=linspace(0,2*pi,1000);
[THETA,FI]=meshgrid(theta,fi);
%Ecuación de la superficie en coordenadas esféricas
RHO=(cos(3*pi*cos(THETA)))^2;
%Ecuación de la superficie en forma paramétrica
X=RHO.*sin(THETA).*cos(FI);
Y=RHO.*sin(THETA).*sin(FI);
Z=RHO.*cos(THETA);
subplot(1,2,1);
mesh(X,Y,Z)
%Gráfica polar
subplot(1,2,2);
theta2D=linspace(0,2*pi,1000);
rho2D=(cos(3*pi*cos(theta2D)))^2;
polar(theta2D,rho2D,'r-')
```

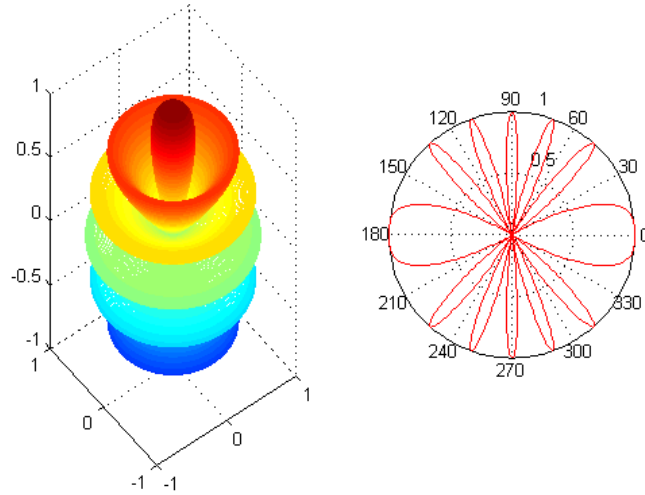


FIG. 19 Diagrama de radiación de un arreglo de dos radiadores isotrópicos separados una distancia $d = 3\lambda$

%DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE UN DIPOLO ELÉCTRICO ELEMENTAL

```
theta=0:pi/200:pi;
fi=0:pi/100:2*pi;
[THETA,FI]=meshgrid(theta,fi);
X=((sin(THETA)).^3).*cos(FI);
Y=((sin(THETA)).^3).*sin(FI);
Z=((sin(THETA)).^2).*cos(THETA);
mesh(X,Y,Z);
grid on
xlabel('EJE X')
ylabel('EJE Y')
zlabel('EJE Z')
```

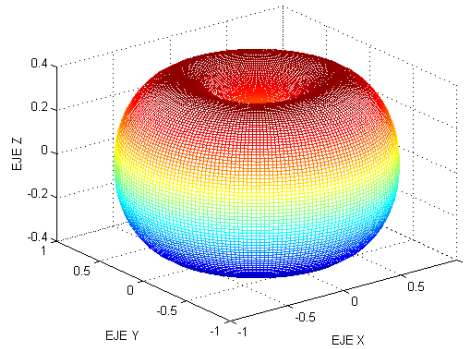


FIG. 20 Diagrama de radiación de un dipolo eléctrico elemental

A1. SERIES DE FOURIER

Sea $f(t)$ una función que cumple los siguientes requisitos:

- Es una función periódica de periodo fundamental T ²⁸
- Está acotada en un intervalo
- Tiene un número finito de máximos y mínimos
- Tiene un número finito de puntos de discontinuidad en un período cualquiera

En las hipótesis precedentes, la función $f(t)$ puede representarse mediante un desarrollo en serie de la forma:

$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos k\omega_0 t + \sum_{k=1}^{\infty} B_k \sin k\omega_0 t$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$$

$$A_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} f(t) \cos k\omega_0 t dt$$

$$B_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} f(t) \sin k\omega_0 t dt$$

con $k=0,1,2,\dots$

Casos particulares:

- Función par $f(t) = f(-t) \Rightarrow B_k = 0$
- Función impar $f(t) = -f(-t) \Rightarrow A_k = 0$
- Función alternada impar $f(t+T/2) = -f(t) \Rightarrow$ Sólo existen armónicos impares, siendo nulo el valor medio.

²⁸ La función $f(t)$ se denomina **periódica** cuando satisface:

$$f(t) = f(t+T) = f(t+2T) = \dots = f(t+nT) \quad \forall t$$

T es el período *fundamental* o *propio*

- Función alternada par $f(t+T/2) = f(t) \Rightarrow$ Sólo existen armónicos pares, con valor medio distinto de cero.

A1.1 Variantes del desarrollo en serie de Fourier

a) Como suma de cosenos:

$$f(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos(k\omega_0 t - \varphi_k)$$

$$a_0 = \frac{A_0}{2}$$

$$a_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2}$$

$$\varphi_k = \arctg\left(\frac{B_k}{A_k}\right)$$

En esta segunda forma, la serie de Fourier aparece como una suma de funciones coseno, determinadas por su:

- Frecuencia
- Amplitud
- Ángulo de fase

De acuerdo con este desarrollo, a la función primitiva $f(t)$, definida en el dominio del tiempo, le corresponde una *función espectral en el dominio de la frecuencia*, caracterizada por un espectro de amplitudes a_k y un espectro de ángulos de fase φ_k .

b) Forma compleja:

Utilizando las fórmulas de Euler:

$$\cos \theta = \frac{e^{j\theta} + e^{-j\theta}}{2} \quad \text{sen } \theta = \frac{e^{j\theta} - e^{-j\theta}}{2j}$$

resulta la forma compleja de la serie de Fourier:

$$f(t) = \frac{1}{T} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} C_k e^{jk\omega_0 t}$$

$$C_k = \int_{-T/2}^{+T/2} f(t) e^{-jk\omega_0 t} dt$$

C_k es el *coeficiente complejo de Fourier*, que representa el espectro de amplitudes en función de la frecuencia.

A2. MAGNITUDES FÍSICAS Y UNIDADES ²⁹

Mientras que los campos eléctricos están asociados sólo a la presencia de cargas eléctricas, los campos magnéticos son el resultado del movimiento físico de cargas eléctricas (corriente eléctrica). Un campo eléctrico \vec{E} , ejerce fuerzas sobre una carga eléctrica y se expresa en voltios por metro ($V m^{-1}$). Similarmente, campos magnéticos pueden ejercer fuerzas físicas sobre cargas eléctricas, pero sólo cuando dichas cargas estén en movimiento. Ambos campos eléctricos y magnéticos tienen magnitud y dirección (i.e., son vectores). Un campo magnético puede estar especificado de dos formas – por la densidad de flujo magnético, \vec{B} , expresada en tesla (T), o por la intensidad del campo magnético, \vec{H} , expresada en amperios por metro ($A m^{-1}$). Las dos cantidades están relacionadas por la expresión:

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

donde μ es la constante de proporcionalidad (la permeabilidad magnética); en el vacío y en el aire, así como en materiales no magnéticos (incluyendo los biológicos), μ tiene el valor $4\pi \times 10^{-7}$ cuando se expresa en henrios por metro ($H m^{-1}$). Entonces, cuando describimos un campo magnético con propósitos de protección, sólo una de estas cantidades \vec{B} o \vec{H} necesita ser especificada.

En la región de campo lejano, el modelo de onda plana es una buena aproximación de la propagación de un campo EM. Las características de una onda plana son:

- Los frentes de onda tienen geometría plana.
- Los vectores \vec{E} y \vec{H} y la dirección de propagación son mutuamente perpendiculares.
- Las fases de los campos \vec{E} y \vec{H} son la misma, y el cociente de amplitudes E/H es constante en todo el espacio. En el vacío, la relación de amplitudes $E/H = 377 \Omega$, que es la impedancia intrínseca del vacío.
- La densidad de potencia, \vec{S} , i.e., la potencia por unidad de área normal a la dirección de propagación, está relacionada con los campos eléctrico y magnético por la expresión:

$$S = EH = \frac{E^2}{377} = 377H^2$$

²⁹ Este apéndice es una traducción del epígrafe "QUANTITIES AND UNITS", inserto en el documento "GUIDELINES FOR LIMITING EXPOSURE TO TIME-VARYING ELECTRIC, MAGNETIC AND ELECTROMAGNETICS FIELDS (UP TO 300 GHZ)" Health Physics, April 1998, Vol.74.

La situación en la región de campo cercano es bastante más complicada porque los máximos y mínimos de los campos E y H no ocurren en los mismos puntos a lo largo de la dirección de propagación como sucede en la región de campo lejano. En la región de campo cercano la estructura del campo EM puede ser altamente inhomogénea y por ello puede haber una sustancial variación de la impedancia de 377 ohmios para una onda plana; esto es, en algunas regiones se puede tener un campo eléctrico muy dominante frente al campo magnético y en otras al revés. Las exposiciones en la zona de campo cercano son más difíciles de especificar, porque ambos campos \vec{E} y \vec{H} deben ser medidos separadamente y porque los diagramas de radiación son más complicados. En esta situación la densidad de potencia ya no es una magnitud apropiada para definir las restricciones a la exposición (como en el caso de campo lejano).

Exposiciones a campos EM variables en el tiempo dan como resultado corrientes en el interior del cuerpo y absorción de energía por los tejidos que dependen de los mecanismos de acoplamiento y de la frecuencia involucrada. El campo eléctrico en el interior y la densidad de corriente están relacionados por la Ley de Ohm:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}$$

donde σ es la conductividad eléctrica del medio. Las magnitudes dosimétricas usadas en estas directrices, teniendo en cuenta diferentes rangos de frecuencia y formas de onda, son las siguientes:

- Densidad de corriente, \vec{J} , en el rango de frecuencias de hasta 10 MHz.
- Corriente, I , en el rango de frecuencias de hasta 110 MHz.
- La tasa de absorción específica, SAR, en el rango de frecuencias de 100 kHz – 10 GHz.
- La absorción específica de energía, SA, para campos pulsantes, en el rango de frecuencias 300 MHz – 10 GHz.
- La densidad de potencia, \vec{S} , en el rango de frecuencias de 10 -300 GHz.

Un resumen general de las magnitudes dosimétricas y unidades usados en estas directrices se muestran en la Tabla 1.

Magnitud	Símbolo	Unidad
Conductividad	σ	S m^{-1}
Corriente	I	A
Densidad de corriente	\vec{J}	A m^{-2}
Frecuencia	f	Hz
Intensidad de campo eléctrico	\vec{E}	V m^{-1}
Intensidad de campo magnético	\vec{H}	A m^{-1}
Densidad de flujo magnético	\vec{B}	T
Permeabilidad magnética	μ	H m^{-1}
Permitividad	ε	F m^{-1}
Densidad de potencia	\vec{S}	W m^{-2}
Absorción específica de energía	SA	J kg^{-1}
Tasa de absorción específica de energía	SAR	W kg^{-1}

Tabla 1. Magnitudes eléctricas, magnéticas, electromagnéticas y dosimétricas y unidades correspondientes en SI

A3. GLOSARIO ³⁰

Absorción específica de energía (SA). Es la energía absorbida por unidad de masa de un tejido biológico, expresada en julios por kg (J kg^{-1}); la absorción específica de energía es la integral en el tiempo de la tasa de absorción específica de energía.

Absorción. En propagación de radio ondas, atenuación, debido a la disipación de la energía de la radio onda, i.e., conversión de su energía en otra forma de energía, como calor.

Barrera hematoencefálica. Concepto funcional desarrollado para explicar por qué algunas sustancias que son transportadas por la sangre penetran fácilmente en otros tejidos pero no en el cerebro. La "barrera" funciona como una membrana continua que reviste la vasculatura del cerebro.

Campo cercano. La región donde la distancia a la antena radiante es menor que la longitud de onda del radiador EM. La intensidad de campo magnético multiplicada por la impedancia del vacío y la intensidad del campo eléctrico no son iguales y, a distancias de la antena menores que la décima parte de la longitud de onda, varía con el cuadrado o el cubo de la distancia si la antena es pequeña comparada con la distancia.

Campo lejano. La región donde la distancia desde una antena radiante excede a la longitud de onda del campo EM radiado.; en el campo lejano, las componentes del campo (E y H) y la dirección de propagación son mutuamente perpendiculares y la forma del diagrama de campo es independiente de la distancia a la fuente.

Conductancia. El inverso de la resistencia. Se expresa en siemens (S).

Conductividad eléctrica. Magnitud escalar o vectorial, que multiplicada por la intensidad del campo eléctrico da como resultado la densidad de corriente; es el inverso de la resistividad. Se expresa en siemens por metro (S m^{-1}).

Constante dieléctrica. Ver permitividad.

Densidad de corriente. Un vector cuya integral sobre una superficie dada es igual a la corriente que atraviesa la superficie; la densidad media en un conductor lineal es igual a la corriente dividida por el área de la sección transversal del conductor. Se expresa en amperios por metro cuadrado (A m^{-2}).

Densidad de flujo magnético. Magnitud vectorial, B , que se traduce en una fuerza que actúa sobre una carga o cargas en movimiento, y se expresa en tesla (T).

³⁰ Traducción del APÉNDICE "GLOSARY" del documento "GUIDELINES FOR LIMITING EXPOSURE TO TIME-VARYING ELECTRIC, MAGNETIC AND ELECTROMAGNETICS FIELDS (UP TO 300 GHZ)" Health Physics, April 1998, Vol.74.

Densidad de potencia. En propagación de radio ondas, la potencia que atraviesa la unidad de área normal a la dirección de propagación; se expresa en vatios por metro cuadrado ($W m^{-2}$).

Dosimetría. Medida o determinación por cálculo, de la intensidad del campo eléctrico interior o de la densidad de corriente inducida, de la absorción específica de energía o de la distribución de la tasa de absorción específica de energía, en humanos o animales expuestos a campos EM.

Efecto atérmico. Algún efecto de la energía electromagnética sobre un cuerpo que no está relacionado con el calentamiento.

ELF. Acrónimo de *Extremely Low Frequency*. Frecuencias por debajo de 300 Hz.

EMF. Acrónimo de *Electric, Magnetic y electromagnetic Field*.

Energía electromagnética. La energía almacenada en un campo EM. Se expresa en julios (J).

Exposición ocupacional. Toda exposición a campos EM experimentada por individuos en el curso del desarrollo de su trabajo.

Exposición pública. Todas las exposiciones a campos EM experimentadas por miembros del público general, excluyendo exposiciones ocupacionales y exposiciones durante procedimientos médicos.

Frecuencia. El número de ciclos por segundo en una onda senoidal. Usualmente se expresa en hertz (Hz).

Impedancia, en ondas. La relación entre el complejo (vector) que representa la componente transversal del campo eléctrico en un punto y la componente transversal del campo magnético en ese punto. Se expresa en ohmios (Ω).

Intensidad de campo eléctrico. La fuerza sobre una carga unidad positiva estática en un punto del campo eléctrico; se mide en voltios por metro ($V m^{-1}$).

Intensidad de campo magnético. Magnitud vectorial que, junto con la densidad de flujo magnético, especifica un campo magnético en cualquier punto del espacio, y se expresa en amperios por metro ($A m^{-1}$).

Longitud de onda. Distancia entre dos puntos sucesivos de una onda periódica en la dirección de propagación, en los que las oscilaciones están en fase.

Microondas. Radiación EM de una longitud de onda suficientemente corta para que sus aplicaciones prácticas se den en guías de ondas y técnicas de transmisión y recepción.

Onda continua. Una onda cuyas oscilaciones sucesivas son idénticas, bajo condiciones de estado estacionario.

Onda plana. Una onda EM en la cual los campos eléctrico y magnético permanecen en un plano perpendicular a la dirección de propagación, y la intensidad de campo magnético (multiplicada por la impedancia del espacio) y la intensidad de campo eléctrico son iguales.

Permeabilidad magnética. Cantidad escalar o vectorial que, multiplicada por la intensidad de campo magnético, da la densidad de flujo magnético.; se expresa en henrio por metro (H m^{-1}). Para medios isotrópos, la permeabilidad magnética es un escalar; para medios anisótropos, es una magnitud tensorial.

Permitividad. Una constante que define la influencia de un medio isotrópico en las fuerzas de atracción o de repulsión entre cuerpos cargados eléctricamente, y se expresa en faradios por metro (F m^{-1}); la permitividad relativa es la permitividad de un material o medio dividida por la permitividad del vacío.

Profundidad de penetración. Para un campo electromagnético con la hipótesis de onda plana, que incide en la frontera de un buen conductor, la profundidad de penetración de la onda es la profundidad a la cual la intensidad del campo eléctrico se ha reducido en un factor $1/e$, o aproximadamente 37% de su valor original.

Radiación no ionizante (NIR). Incluye todas las radiaciones y campos del espectro electromagnético que no tienen normalmente suficiente energía para producir ionización en la materia; se caracterizan por una energía fotónica menor que aproximadamente 12 eV, longitudes de onda mayores que 100 nm, y frecuencias por debajo de 3×10^{15} Hz.

Radio frecuencia (RF). Alguna frecuencia a la cual la radiación EM es usada para telecomunicación. En esta publicación, radio frecuencia se refiere a un rango de frecuencias 300 Hz – 300 GHz.

Raíz cuadrática media (rms). Ciertos efectos eléctricos son proporcionales a la raíz cuadrada del valor medio del cuadrado de una función periódica (sobre un periodo). Este valor es conocido como eficaz o raíz cuadrática media porque deriva de, primero elevar al cuadrado la función, después determinar el valor medio y, por último extraer la raíz cuadrada del valor medio

Resonancia. El cambio en amplitud que tiene lugar cuando la frecuencia de la onda se aproxima o coincide con la frecuencia natural del medio; la absorción del cuerpo entero a ondas EM presenta los valores más altos, i.e., la resonancia, para frecuencias (en MHz) correspondiendo con aproximadamente $114/L$, donde L es la altura del individuo en metros.

Tasa de absorción específica de energía (SAR). Es la velocidad a la cual la energía es absorbida por tejidos corporales, en watios por kg (W kg^{-1}); SAR es la medida dosimétrica que ha sido extensamente adoptada a frecuencias por encima de 100 kHz.