



MOVIMIENTO ONDULATORIO. GENERALIDADES



- **Propagación de una propiedad física o una perturbación** 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 (ondas EM)
 - **En un movimiento ondulatorio se transmite o propaga una condición dinámica:** cantidad de movimiento y energía.
-



ONDAS ELÁSTICAS Y ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS



- Las ondas elásticas requieren un medio material como soporte a su transmisión.
 - Las ondas electromagnéticas no requieren un medio material para su propagación.
 - Las **Ecuaciones de Maxwell** explican la transmisión a distancia de energía y cantidad de movimiento.
 - Las ondas elásticas y las electromagnéticas satisfacen la “**Ecuación de ondas**”.
-



ECUACIÓN DE ONDAS DE D'ALEMBERT



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

- La ecuación diferencial es válida para cualquier perturbación \mathbf{x} que se desplace con velocidad v .
 - La perturbación puede tener carácter escalar o vectorial.
 - La ecuación de ondas es lineal: es aplicable el **principio de superposición**
-



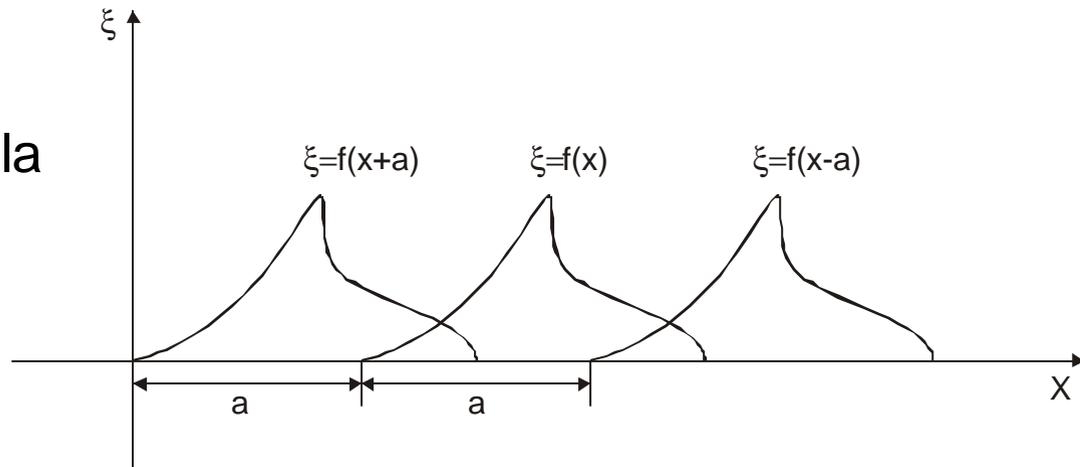
SOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DE D'ALEMBERT



- Para el caso de ondas planas elementales, la solución es de la forma:

$$\mathbf{x} = f_1(x - vt) + f_2(x + vt)$$

- El doble signo de la función arbitraria determina el sentido de la propagación (onda progresiva o regresiva).





ONDAS LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES



- En las ondas **longitudinales** la perturbación que se propaga tienen la misma dirección que la propagación, por ejemplo, las ondas sonoras.
 - En las ondas **transversales** la perturbación tiene dirección normal a la propagación. **Las ondas electromagnéticas son transversales: los campos eléctrico y magnético son perpendiculares entre sí y situados en un plano normal a la dirección de propagación.**
-



FRECUENCIA Y LONGITUD DE ONDA



- **Ecuaciones** que interrelacionan frecuencia, longitud de onda, periodo, velocidad de propagación, número de onda y pulsación:

$$l = \frac{2p}{k}$$

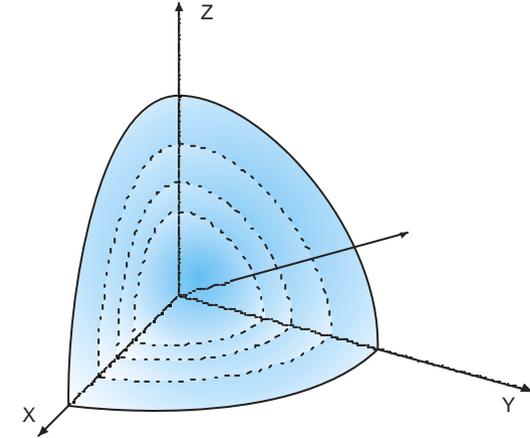
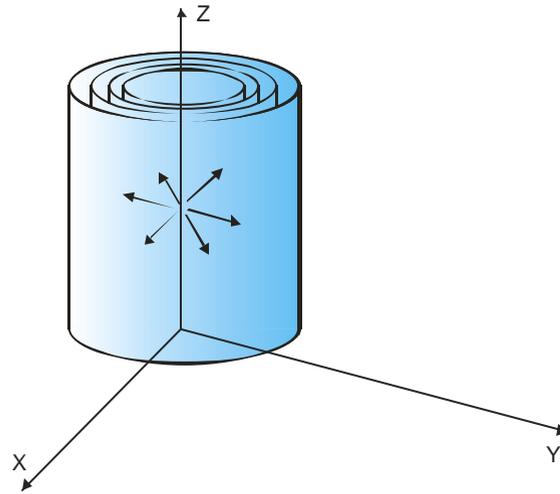
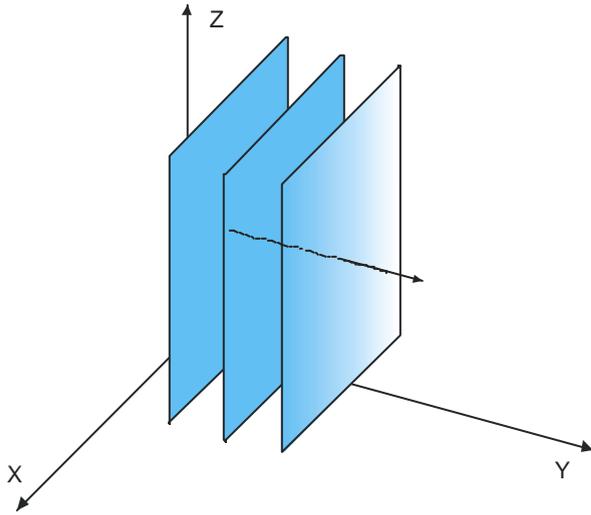
$$T = \frac{2p}{kv} = \frac{l}{v}$$

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

$$w = \frac{2p}{T} = 2pf$$



ONDAS PLANAS, CILÍNDRICAS Y ESFÉRICAS





ECUACIONES DE MAXWELL



- Se expresan en **forma vectorial** y en **forma fasorial** (sólo para ondas armónicas):

$$\nabla \cdot \vec{D}(\vec{r}, t) = \mathbf{r}(\vec{r}, t)$$

$$\nabla \cdot \vec{B}(\vec{r}, t) = 0$$

$$\nabla \times \vec{E}(\vec{r}, t) + \frac{\partial}{\partial t} \vec{B}(\vec{r}, t) = 0$$

$$\nabla \times \vec{H}(\vec{r}, t) - \frac{\partial}{\partial t} \vec{D}(\vec{r}, t) = \vec{J}(\vec{r}, t)$$

$$\nabla \cdot \bar{D} = \mathbf{r}$$

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0$$

$$\nabla \times \bar{E} + j\omega \cdot \bar{B} = 0$$

$$\nabla \times \bar{H} = j\omega \cdot \bar{D} + \bar{J}$$



IMPEDANCIA INTRÍNSECA DEL VACÍO. RELACIÓN E-H



- Los campos E y H son perpendiculares entre sí y están en un plano normal a la dirección de propagación.
- Los campos E y H se relacionan mediante la impedancia intrínseca del vacío.

$$\vec{H}(\vec{r}, t) = \pm \frac{\vec{n} \times \vec{E}(\vec{r}, t)}{h_o} \quad h_o = \sqrt{\frac{m_o}{e_o}} = \sqrt{\frac{4p \times 10^{-7}}{\frac{10^{-9}}{36p}}} = 120p \cong 377 \Omega$$



VECTOR DE POYNTING Y DENSIDAD DE POTENCIA



- Para ondas armónicas el **vector de Poynting** se representa como un fasor temporal, cuyo valor medio es la **densidad de potencia S**

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

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



VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS EM



- En el vacío:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{10^{-9}}{36\pi}\right) \cdot (4\pi \cdot 10^{-7})}} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$$

- En un medio material:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}} = \frac{1}{\sqrt{(\epsilon_0 \cdot \mu_0) \cdot (\epsilon_r \cdot \mu_r)}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}} = \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}}$$



ABSORCIÓN DE RF Y MO EN EL CUERPO HUMANO



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 MHz < f < 400 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 MHz < f < 2000 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 GHz < f < 300 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



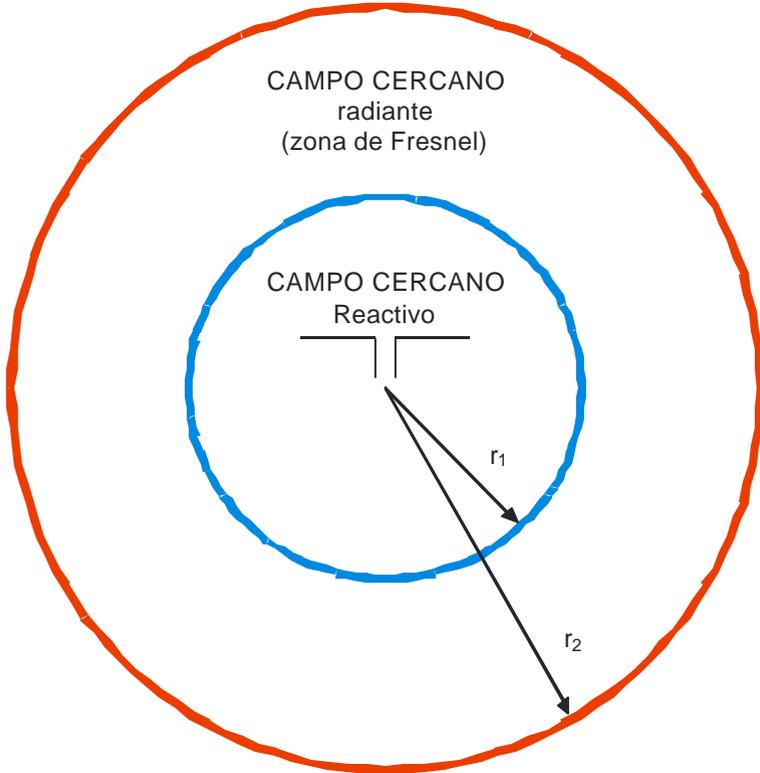
CAMPO CERCANO Y CAMPO LEJANO (1)



CAMPO LEJANO
(zona de radiación o de
Fraunhofer)

CAMPO CERCANO
radiante
(zona de Fresnel)

CAMPO CERCANO
Reactivo



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

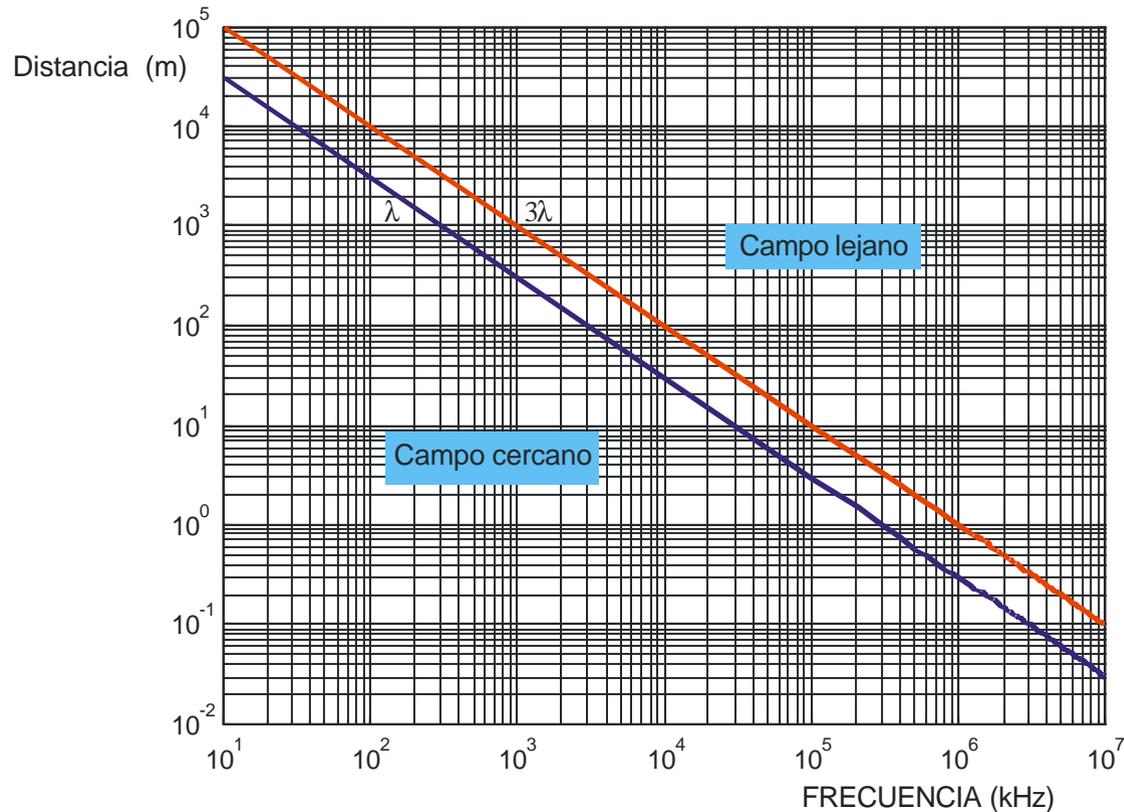
$$r_2 = \frac{2D^2}{\lambda}$$



CAMPO CERCANO Y CAMPO LEJANO (2)



- Otra forma, aproximada, de delimitar las regiones de campo lejano y cercano:





ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO (1)



- La frontera entre ionizante y no ionizante es $12,4 \text{ eV} = 3 \text{ PHz}$

	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
NUV	30 PHz	10 nm	124 eV
NIR	3 PHz	100 nm	12,4 eV
MIR	300 THz	1 μm	1,24 eV
FIR	30 THz	10 μm	124 meV
EHF	3 THz	100 μm	12,4 meV
SHF	300 GHz	1 mm	1,24 meV
UHF	30 GHz	1 cm	124 μeV
VHF	3 GHz	1 dm	12,4 μeV
HF	300 MHz	1 m	1,24 μeV
MF	30 MHz	1 dam	124 neV
LF	3 MHz	1 hm	12,4 neV
VLF	300 kHz	1 km	1,24 neV
VF	30 kHz	10 km	124 peV
ELF	3 kHz	100 km	12,4 peV
	300 Hz	1 Mm	1,24 peV
	30 Hz	10 Mm	124 feV

$$l = \frac{c}{f}$$
$$E = h \cdot f$$



ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO (2)



■ ACRÓNIMOS

<i>g</i>	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)



ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO (3)



■ BANDAS DE FRECUENCIAS SEGÚN LA ITU

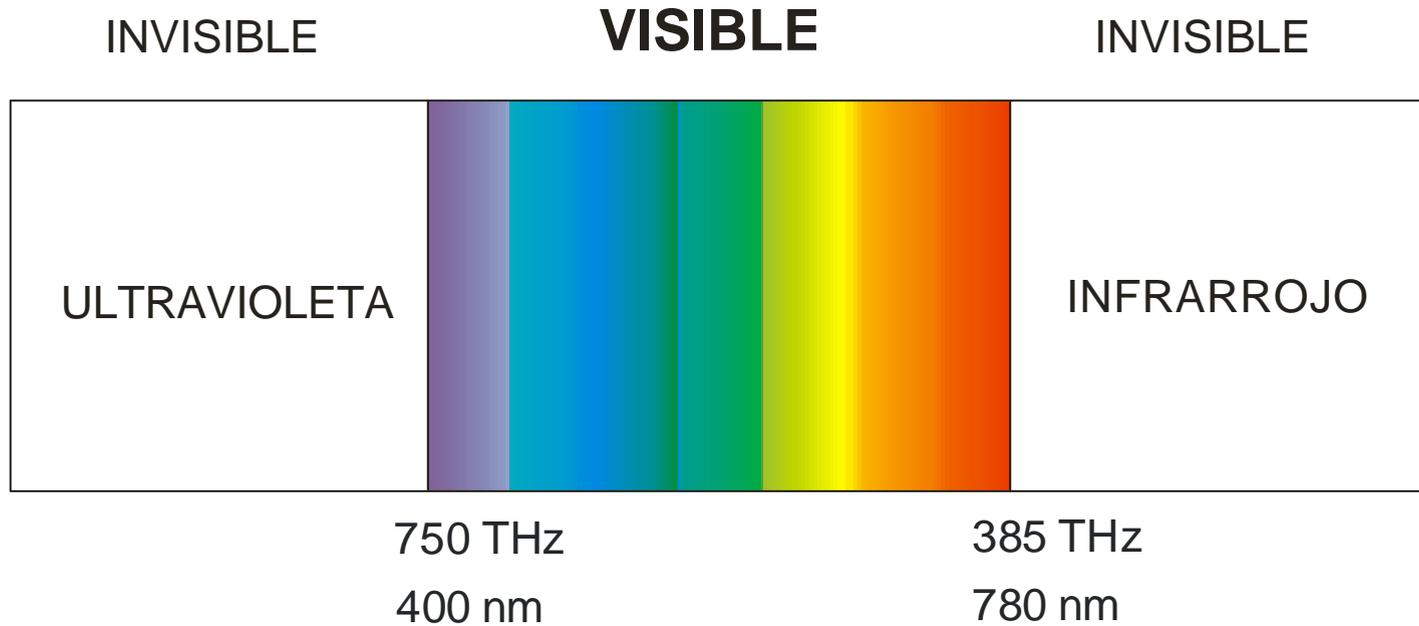
Banda	Acrónimo	Rango de frecuencia
Frecuencia extra alta	EHF (microondas)	30 – 300 GHz
Frecuencia super alta	SHF (microondas)	3 – 30 GHz
Frecuencia ultra alta	UHF	300 – 3000 MHz
Frecuencia muy alta	VHF	30 – 300 MHz
Frecuencia alta	HF	3 – 30 MHz
Frecuencia media	MF	300 – 3000 KHz
Frecuencia baja	LF	30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



ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO (4)



- LUZ VISIBLE





ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO (5)



■ BANDAS DE RF

Banda	Acrónimo	Banda ITU	Frecuencia	Longitud de onda
Frecuencia extremadamente baja	ELF	2	3-30 Hz	100000-10000 km
Frecuencia super 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 super alta	SHF	10	3-30 GHz	100-10 mm
Frecuencia extremadamente alta	EHF	11	30-300 GHz	10-1 mm



EMISIONES EM. ORGANIZACIONES INTERNACIONALES



- **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 ultrabajas (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 ELECTROMAGNETIC 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.
-



EMISIONES EM. EFECTOS SOBRE LA SALUD HUMANA



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.
 - **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.
-



TASA DE ABSORCIÓN ESPECÍFICA DE ENERGÍA (SAR)



- 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:

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



PARÁMETROS DE LOS TEJIDOS HUMANOS (1)



- A 900 MHz

TIPO DE TEJIDO	DENSIDAD r (kg/m ³)	CONDUCTIVIDAD s (S m ⁻¹)	PERMITIVIDAD RELATIVA e_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



PARÁMETROS DE LOS TEJIDOS HUMANOS (2)



- A 1800 MHz

TIPO DE TEJIDO	DENSIDAD r (kg/m ³)	CONDUCTIVIDAD s (S m ⁻¹)	PERMITIVIDAD RELATIVA e_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



CANTIDADES DOSIMÉTRICAS USADAS EN LAS DIRECTRICES INTERNACIONALES



- 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*.
-



TIPOS DE ANTENAS



- Según el **modo de radiación**
 - ❖ Dipolo eléctrico.
 - ❖ Dipolo magnético[1].
 - ❖ 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.

[1] Los dipolos eléctrico y magnético se conocen como “antenas de elemento de corriente”.



PARÁMETROS FUNDAMENTALES DE LAS ANTENAS



- **IMPEDANCIA DE ENTRADA**
 - **DENSIDAD DE POTENCIA RADIADA**
 - **POTENCIA MEDIA RADIADA**
 - **DIRECTIVIDAD**
 - **GANANCIA**
 - **RENDIMIENTO**
 - **DIAGRAMAS DE RADIACIÓN**
-



UN EJEMPLO DE DIAGRAMA DE RADIACIÓN. PROGRAMA MATLAB



```
%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-')
```



UN EJEMPLO DE DIAGRAMA DE RADIACIÓN. GRÁFICAS 3D Y 2D

