
MEDIDA DE EMISIONES ELECTROMAGNÉTICAS.



<http://catedra-coitt.euitt.upm.es/>

Madrid, Abril de 2006.



Seminario: Medida de Emisiones Electromagnéticas.

Campos Electromagnéticos y Antenas 1



Programa.

- **Campos electromagnéticos.**
- **Antenas.**
- **Campos de baja frecuencia (ELF).**
- **Sistemas de Radiocomunicación.**
- **Normativa y elaboración de informes.**
- **Procedimientos de medida.**
- **Prácticas.**



Seminario: Medida de Emisiones Electromagnéticas.

Campos Electromagnéticos y Antenas 2



Introducción.

¿INFLUYEN LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL MEDIO AMBIENTE?

- EN LA SALUD. (EFECTOS BIOLÓGICOS)
- IMPACTO VISUAL.

¿QUIÉN PRODUCE CEM?

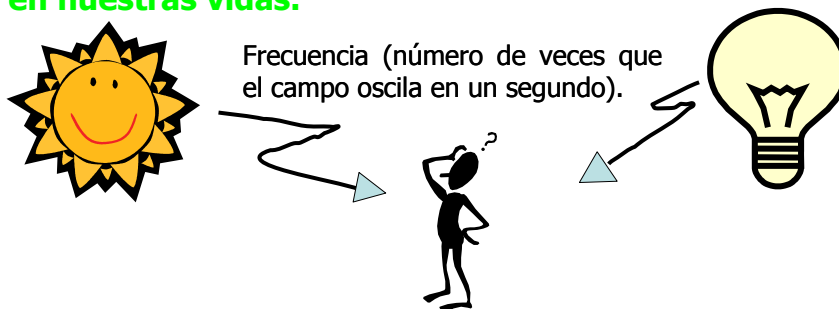
Necesitamos conocer:

- ✓ ELECTROMAGNETISMO. (Propagación de Ondas)
- ✓ ANTENAS.
- ✓ NORMATIVA.



Consideraciones generales (I).

La radiación electromagnética siempre está presente en nuestras vidas.



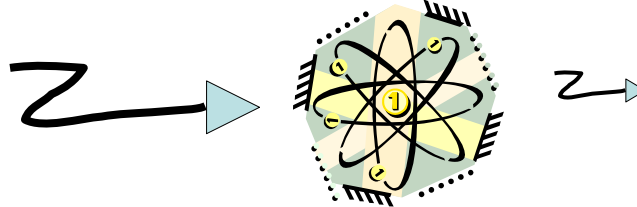
¿Cómo nos afectan las ondas electromagnéticas?

Energía proporcional (intensidad, frecuencia,..) ➡ Mayor frecuencia, mayor energía.



Consideraciones generales (II).

Las ondas electromagnéticas interactúan con la materia transfiriendo parte de la energía que transporta.



¿Energía suficiente para arrancar un electrón?

SI
IONIZANTE

NO
NO-IONIZANTE

Por debajo de un nivel no es posible arrancar un electrón y por tanto no se modificará la estructura de la materia.



Consideraciones generales (III).

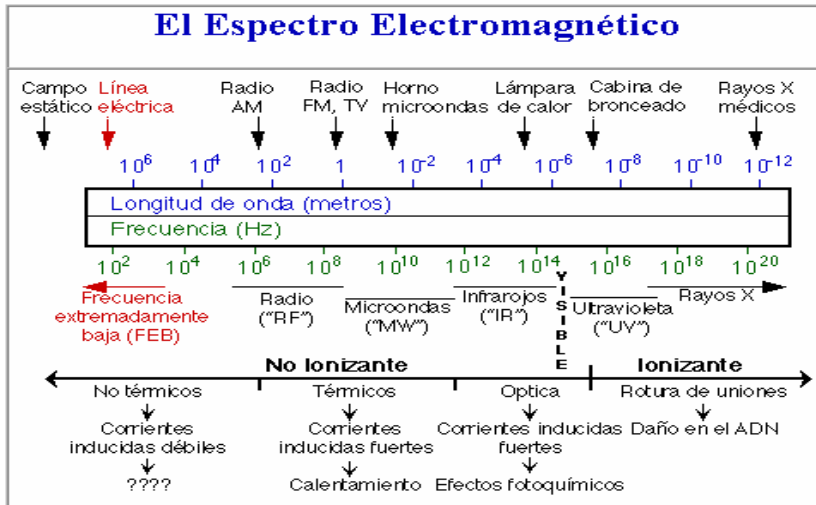
Al existir un nivel mínimo, por debajo de una frecuencia no es posible ionizar la materia. Las radiaciones electromagnéticas que se produzcan a frecuencias más bajas serán **no-ionizantes**.

Ejemplos de **radiaciones ionizantes** son los rayos ultravioleta, los rayos X y ciertas radiaciones liberadas por los materiales radiactivos. Las **frecuencias** de estas ondas son **varios millones de veces superiores** a las frecuencias empleadas en los sistemas de radiocomunicación.

Se puede afirmar que las ondas utilizadas en radiocomunicación **no son ionizantes**.



Consideraciones generales (IV).



Bandas de frecuencia.

Clasificación del espectro hasta 300 GHz por el IEEE-UIT. (utilización-propag).

Nombre	Nombre Completo	Rango de frecuencias	Aplicaciones
ULF	Ultra-Low Frequencies	3-30 Hz	
ELF	Extremely-Low Freq.	30-300 Hz	Comunicaciones con submarinos
VF	Voice Frequencies	300-3000 Hz	
VLF	Very-Low Frequencies	3-30 KHz	Comunicaciones con submarinos
LF	Low Frequencies	30-300 KHz	Navegación
MF	Medium Frequencies	300-3000 KHz	Radiodifusión AM
HF	High Frequencies	3-30 MHz	Onda corta, Radioaficionados
VHF	Very High Frequencies	30-300 MHz	Radiodifusión FM, Móviles
UHF	Ultra High Frequencies	300-3000 MHz	Televisión, C. Móviles, GPS
SHF	Super High Frequencies	3-30 GHz	Satélites, radioenlaces, LMDS
EHF	Extremely High Freq.	30-300 GHz	Satélites, Radioastronomía

ELF para aspectos relacionados con el medio ambiente y la salud.

OMS: $f < 100$ KHz

Radiofrecuencia y Microondas



Consideraciones generales (V).

Si no son ionizantes, ¿Qué efectos pueden producir?



- **Perjudiciales** (quemaduras solares)
- **Beneficiosos** (producción vitamina D)
- **Inofensivos** (rojeces).



Las radiaciones electromagnética serán inofensivas o perjudiciales dependiendo del grado de exposición (intensidad y tiempo de exposición).

Los niveles máximos dependen de la frecuencia.

Las ondas electromagnéticas producen un efecto térmico (microondas). Como el cuerpo tiene un alto porcentaje de agua, sería posible un calentamiento: *Existen limitaciones en la potencia.*



CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS.



Introducción al electromagnetismo (I).

DEFINICIONES INICIALES.

- Fuentes de campos electromagnéticos: Cargas eléctricas en reposo o en movimiento y los campos electromagnéticos.
- La carga eléctrica (q, Q) se mide en *Coulomb* (C). La carga del electrón vale: $e=1.6 \cdot 10^{-19}$ C.
- Zonas amplias (no a escala atómica) utilizamos la densidad volumétrica de carga (C/m^3). En algunas situaciones concretas (C/m^2) o (C/m).
- Un postulado fundamental es la conservación de la carga.
- Intensidad de corriente I , medida Ampere (A).
- La densidad de corriente (\mathbf{J}) mide la cantidad de corriente que fluye por un área unidad normal a la dirección del flujo de corriente.



Introducción al electromagnetismo (II).

Las cuatro cantidades vectoriales que se usan fundamentalmente en la medida de campos electromagnéticos son:

- Intensidad de campo eléctrico \mathbf{E} (V/m)**, que representa la fuerza eléctrica por unidad de carga.
- Intensidad de campo magnético \mathbf{H} (A/m)**, equivalente al anterior para el caso de cargas magnéticas.
- Densidad de flujo eléctrico** (desplazamiento eléctrico) **\mathbf{D} (C/m²)**, que se utiliza básicamente en el estudio de medios materiales.
- Densidad de flujo magnético \mathbf{B} (T)**, relacionado con la fuerza magnética que actúa sobre una carga que se mueve con una velocidad determinada.

Cuando no existen variaciones temporales (electrostática y magnetostática) los vectores \mathbf{E} y \mathbf{D} y los vectores \mathbf{H} y \mathbf{B} forman dos pares de vectores que son independientes. Sin embargo cuando tenemos **variaciones con el tiempo, los vectores eléctricos y magnéticos están relacionados.**



Electrostática en medios materiales

Los materiales se clasifican en tres grandes grupos dependiendo de la facilidad con la que pueden moverse los electrones:

- **Conductores**, los electrones se mueven con gran facilidad entre átomos.
- **Aislantes**, las uniones de los electrones con el átomo son muy fuertes y es muy difícil que un electrón pase de un átomo a otro.
- **Semiconductores**, situación intermedia entre las anteriores.

En el interior de un buen conductor tanto la carga como el campo eléctrico, al menos las componente tangenciales, son nulos. Solo pueden existir componentes normales a la superficie, por tanto **en estática un conductor es una superficie equipotencial**.



Ondas electromagnéticas planas.

Existen cuatro ecuaciones, conocidas como **ecuaciones de Maxwell**, que explican los fenómenos electromagnéticos.

La solución general del campo eléctrico asociado a una onda electromagnética plana, armónica y monocromática de frecuencia f (pulsación ω), que se propaga por un medio sin pérdidas, es de la forma:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_e(z) \cdot e^{j\omega t} = (E_{x0} \hat{i} + E_{y0} \hat{j}) \cdot e^{j(\omega t \pm \beta \cdot z)}$$

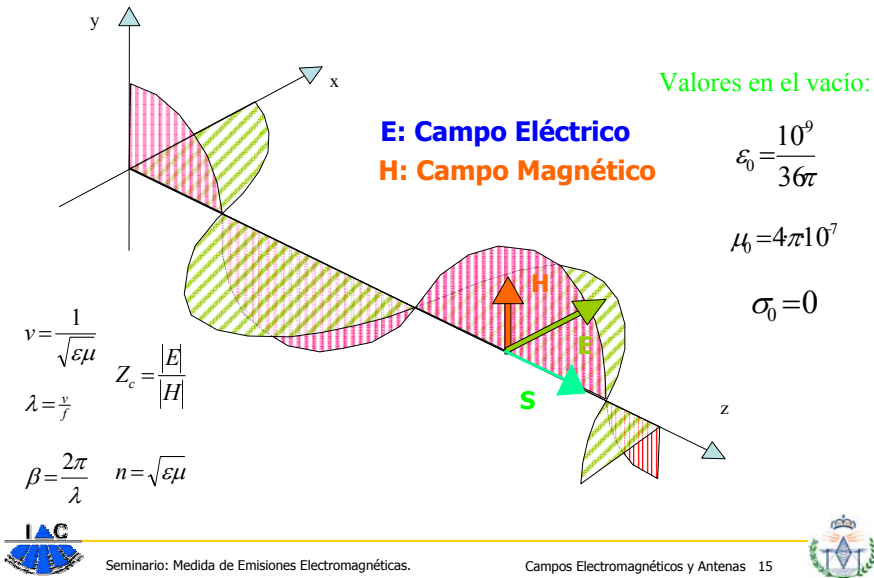
donde β es el llamado número de onda (también se utiliza \mathbf{k}). El signo de la exponencial compleja depende de la dirección de propagación.

El campo magnético viene dado por:

$$\vec{H}(\vec{r}, t) = \vec{H}_e(z) \cdot e^{j\omega t} = (H_{x0} \hat{i} + H_{y0} \hat{j}) \cdot e^{j(\omega t \pm \beta \cdot z)}$$



Campos electromagnéticos en un medio.



Ondas electromagnéticas planas.

Definimos la impedancia del medio como el cociente entre el módulo del vector campo eléctrico y el módulo del vector campo magnético.

En los medios con pérdidas aparece γ , denominada **constante de propagación**, que consta de una parte real (α), denominada **constante de atenuación** y una parte imaginaria (β) **constante de fase**.

Se define la **profundidad de penetración**, δ , como aquella distancia que debe recorrer la onda para que la amplitud del campo eléctrico haya disminuido a un valor $1/e$. Es igual a la inversa de la constante de atenuación (α):

Buen Dieléctrico: $\frac{\epsilon \cdot \omega}{\sigma} \gg 1$ Buen Conductor: $\frac{\epsilon \cdot \omega}{\sigma} \ll 1$

ANTENAS.



Fundamentos de radiación.

Los fenómenos de radiación están gobernados por las ecuaciones de Maxwell, a las que debemos añadir la ecuación de continuidad, representación del principio de conservación de la carga. Dichas ecuaciones son:

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega \vec{B} \quad \text{Ley de Faraday}$$

CAMPOS

- Intensidad (E, H)
- Inducción (D, B)

$$\nabla \times \vec{H} = -j\omega \vec{D} + \vec{J} \quad \text{Ley de Amper generalizada}$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad \text{Ley de Gauss}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{Continuidad del flujo magnético}$$

FUENTES

- ρ : Densidad de carga eléctrica
- \vec{J} : Densidad de corriente
- \vec{J}_c : Den. corr. de conducción

$$\nabla \cdot \vec{J} + j\omega \rho = 0 \quad \text{Ecuación de Continuidad}$$

$$\left. \begin{aligned} \vec{D} &= \epsilon \vec{E} \\ \vec{B} &= \mu \vec{H} \\ \vec{J}_c &= \sigma \vec{E} \end{aligned} \right\} \text{Ecuaciones de la materia}$$

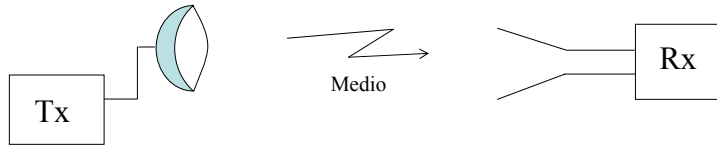


Definición de Antena.

Los elementos encargados de enviar/captar las ondas electromagnéticas al/del espacio son las antenas. Éstas son estructuras especialmente diseñadas para radiar y captar ondas electromagnéticas que adaptan la salida/entrada del transmisor/receptor al medio.

Características fundamentales de una antena:

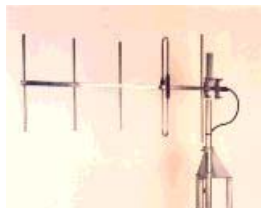
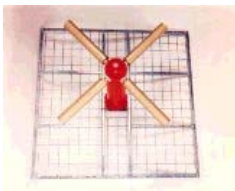
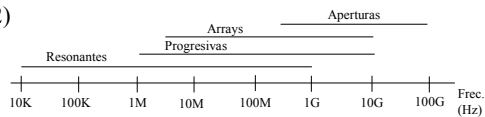
- Impedancia.
- Propiedades directivas.
- Polarización.



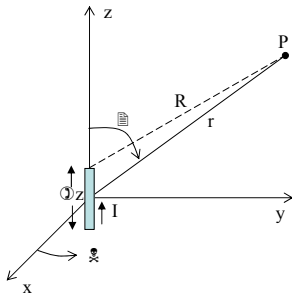
Tipos de Antenas.

Dependiendo de la constitución y el “modo de radiación”, se definen cuatro tipos de antenas:

- Antenas de hilo
 - Antenas resonantes (dipolo $\lambda/2$)
 - Antenas progresivas (hélice)
- Agrupación de antenas (arrays)
- Aperturas (bocinas, reflectores)



Aplicación al dipolo ideal.



A partir de las ecuaciones de Maxwell se puede llegar al vector potencial \vec{A} , y obtener los campos eléctrico y magnético.

$$\vec{A} = \iiint_V \vec{J} \frac{e^{-j\beta R}}{4\pi R} dv \quad \left\{ \begin{array}{l} \vec{H} = \nabla \times \vec{A} \\ \vec{E} = \frac{1}{j\omega\epsilon} (\nabla \times \vec{H} - \vec{J}) = -j\omega\mu\vec{A} + \frac{\nabla(\nabla \cdot \vec{A})}{j\omega\epsilon} \end{array} \right.$$

Para el dipolo ideal (según la figura) obtenemos:

$$\vec{A} = \frac{I\Delta z}{4\pi r} e^{-j\beta r} \vec{z} \quad \text{En esféricas:} \quad \begin{array}{l} A_r = A_z \cos(\theta) \\ A_\theta = A_z \sin(\theta) \end{array}$$

$$\vec{E} = \frac{I\Delta z}{2\pi r} j\omega\mu \left[\frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{j\beta r} + \frac{1}{(j\beta r)^2} \right) \sin(\theta) \hat{\theta} + \left(\frac{1}{j\beta r} + \frac{1}{(j\beta r)^2} \right) \cos(\theta) \hat{r} \right] e^{-j\beta r}$$



Polarización.

Es la figura que forma el campo eléctrico en función del tiempo, visto por un observador desde la antena transmisora, para una dirección determinada.

$$\vec{E} = (E_{\theta 0} \cos(\omega t)) \vec{\theta} + (E_{\phi 0} \cos(\omega t + \delta)) \vec{\phi}$$

POLARIZACIÓN LINEAL:

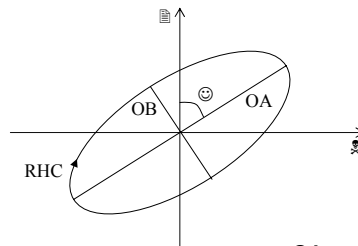
- $E_{\theta 0} = 0$ ó $E_{\phi 0} = 0$ ó $\delta = 0, \pm n\pi$

POLARIZACIÓN CIRCULAR:

- $E_{\theta 0} = E_{\phi 0}$ y $\delta = \pm \frac{\pi}{2}$

POLARIZACIÓN ELÍPTICA:

- Resto de casos.



$$\text{Relación Axial: } AR = \frac{OA}{OB}$$

La polarización circular y elíptica pueden ser: "a derechas" (RHC) o "a izquierdas" (LHC).

COPOLAR \Leftrightarrow CONTRAPOLAR.



Regiones de Fresnel y Fraunhofer.

Doble dependencia con la distancia:

- $1/r$ (campo lejano o campos radiados)
- $1/r^n$ (campo cercano o campos inducidos).

Podemos establecer la frontera entre las regiones a partir del error cometido en la fase al hacer $R=r$. Para el caso de una antena de dimensión máxima D , situada según el eje z , se obtienen los siguientes valores:

$$2 \frac{D^2}{\lambda} \leq r \leq \infty$$

Denominamos región de Fraunhofer a la que va desde $r=\infty$ hasta el r que hace que la fase del primer término del desarrollo de $R-r$ sea $\pi/8$.

La región en la que el siguiente término del desarrollo en serie adquiere el valor de $\pi/8$, se denomina región de Fresnel, y viene dada por:

$$0.6 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \leq r \leq 2 \frac{D^2}{\lambda}$$



Diagrama de radiación (I).

Es la representación gráfica de las propiedades direccionales de una antena en función de las coordenadas espaciales. Generalmente se representan valores normalizados respecto al máximo y suele utilizarse una escala logarítmica (dB).

- ❑ Los diagramas que se representan típicamente son de dos tipos:
 - ✓ De Campo: El módulo o alguna de las componentes \vec{E} o \vec{H} .
 - ✓ De Potencia: Ganancia o Directividad
- ❑ Tipos de diagramas (forma de representarlos):
 - ✓ Tridimensionales (dificultad en la representación).
 - ✓ Diagrama de dos dimensiones (2D).
 - Generalmente se trata de representaciones de curvas de nivel.
 - ✓ Cortes del diagrama.
 - Cortes por un plano. Típicamente se utilizan $\theta = \text{cte}$, o $\phi = \pi/2$.
 - En altas frecuencias se utilizan el "plano H" y "plano E"



Diagrama de radiación (II).

En las dos figuras siguientes se muestran dos ejemplos de representación de diagramas, uno tridimensional y otro bidimensional.

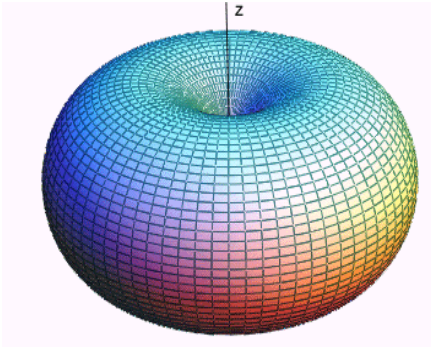


Diagrama tridimensional.

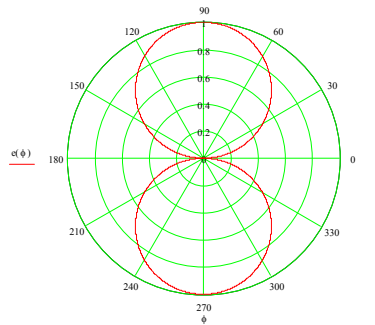
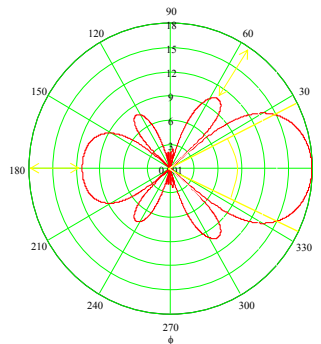


Diagrama bidimensional.

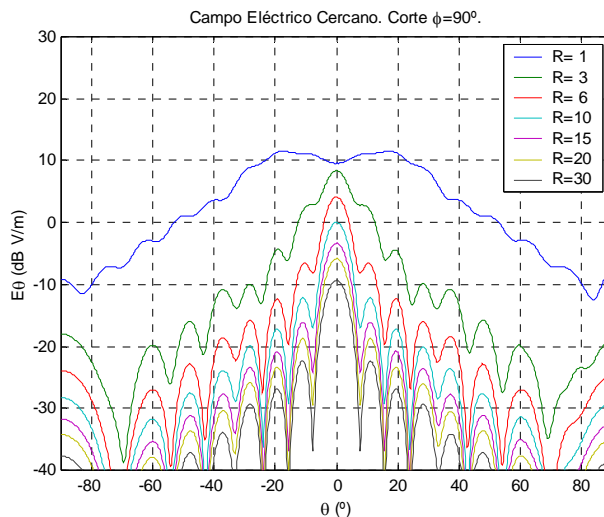


Parámetros del diagrama de radiación.

- ❑ Lóbulo: porción del diagrama entre dos nulos (mínimos).
 - ✓ Principal: Contiene la dirección de máxima radiación.
 - ✓ Secundarios.
 - ✓ Laterales.
 - ✓ Posterior.
- ❑ Nivel de lóbulos secundarios (SLL).
- ❑ Ancho (Abertura) del haz principal a -3 dB (puntos de potencia mitad)
- ❑ Ancho del haz entre nulos.
- ❑ Relación delante-atrás.



Variación del diagrama de radiación.



Directividad.

- La Intensidad de Radiación es la potencia radiada por unidad de ángulo sólido.
- Se denomina Antena Isotrópica a aquella antena que radia por igual en todas las direcciones del espacio. Por tanto la intensidad de radiación es constante de valor $P_r/4\pi$.
- Se define la Directividad como el cociente entre la intensidad de radiación en una dirección dada y la intensidad de radiación de una antena isotrópica que radiase la misma potencia total.
- Cuando nos referimos únicamente a la Directividad, sin hacer referencia a la dirección, quiere decir que nos referimos a la dirección en la cual es máxima. A ese valor generalmente se le denomina D_0 .
 - ✓ D_0 es la ganancia por directividad en la dirección de máxima radiación.
 - ✓ D_0 siempre es mayor que la unidad (0 dB).
 - ✓ Generalmente suele expresarse en dB: $10 \cdot \log(D_0)$

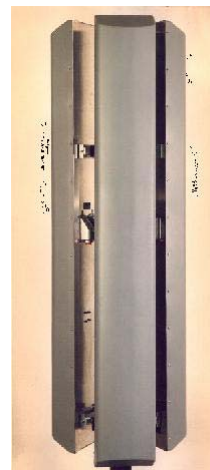
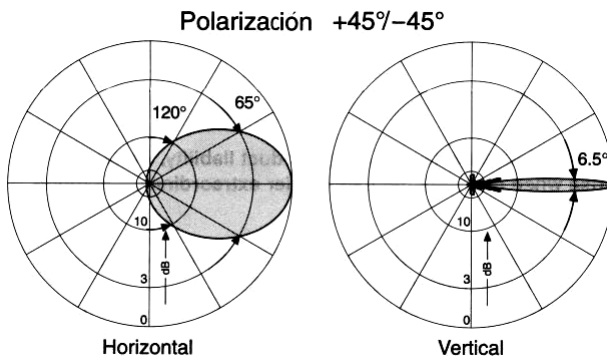


Ganancia.

- ❑ Definimos la Ganancia de igual forma que la Directividad, pero utilizando la potencia entregada en lugar de la potencia radiada.
- ❑ Cuando nos referimos a la dirección de máxima radiación utilizamos G_0 .
 - ✓ G_0 es la ganancia de potencia en la dirección de máxima radiación.
 - ✓ G_0 si podría ser menor que la unidad (0 dB).
 - ✓ Generalmente suele expresarse en dB; $10 \cdot \log(G_0)$
- ❑ Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (P.I.R.E).
- ❑ Potencia Radiada Aparente (P.R.A).
- ❑ En antenas que sean muy directivas (diagrama tipo pincel), como pueden ser las parábolas, tenemos:
 - ✓ $\Omega_A \cong \Omega_{1r} \cdot \Omega_{2r}$ (anchuras del haz a -3 dB).
 - ✓ La Directividad puede calcularse como: $D_0 = \frac{4\pi}{\theta_{1r} \cdot \theta_{2r}} = \frac{41253}{\theta_{1g} \cdot \theta_{2g}}$



Ejemplo típico de móviles.



Una antena utilizada habitualmente en las estaciones base de telefonía móvil tiene una apertura de unos 6.5° en el plano vertical y unos 65° en el plano horizontal. Su directividad será de 97.6, aproximadamente 20 dB.



Apertura.

➤ Definimos la Apertura o superficie equivalente de recepción al cociente entre la potencia entregada al receptor y la densidad de potencia.

➤ Dado que la apertura es otra forma de medir las propiedades directivas de las antenas, estará relacionada con la directividad.

$$\frac{D_{A0}}{D_{B0}} = \frac{A_{A0}}{A_{B0}} \Rightarrow D = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_e$$

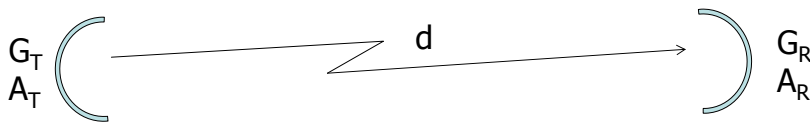
➤ La apertura de una antena isotrópica vale $\lambda^2/4\pi$.

➤ Mediante la ecuación anterior podemos obtener fácilmente la densidad de potencia a partir de las medidas en un analizador de espectros. Simplemente tendremos que dividir la potencia recibida por la apertura de la antena utilizada.



Antenas en Comunicaciones.

Desde el punto de vista de un sistema de Radiocomunicación, la influencia de la antena viene puesta de relieve en las fórmulas de transmisión de Friis.



$$P_r = \frac{P_T \cdot G_T \cdot A_R}{4 \cdot \pi \cdot d^2} = \frac{P_T \cdot G_T \cdot G_R \cdot \lambda^2}{(4\pi d)^2} = \frac{P_T \cdot A_T \cdot A_R}{\lambda^2 \cdot d^2}$$

$$P_r(\text{dBm}) = \begin{cases} P_T(\text{dBm}) + G_T(\text{dB}) + G_R(\text{dB}) - \\ - 20 \log(d(\text{Km})) - 20 \log(f(\text{MHz})) - 32.45 \end{cases}$$

ESTA ECUACIÓN SÓLO ES VÁLIDA EN CAMPO LEJANO



CAMPOS DE BAJA FRECUENCIA (ELF).



EMISIONES DE BAJA FRECUENCIA ELF

- Campos Electromagnéticos ELF .
 - ✓ De forma estricta, entre 30 y 300 Hz.
 - ✓ De manera amplia, campos por debajo de 30 KHz.
 - ✓ A estas frecuencias el campo eléctrico y el Magnético son considerados como independientes, no "acoplándose" ni "propagándose" como onda.
- Las principales fuentes de este tipo de campos:
 - Las líneas eléctricas.
 - Cualquier aparato alimentado eléctricamente.
- Preocupación creciente sobre los efectos biológicos y sobre la salud humana de los CEM.
 - Un elevado número de estudios e investigaciones.
 - Alta complejidad para determinar los parámetros de interés y su influencia.
 - Intervención de varias disciplinas.
 - Parámetros de exposición. Dosimetría.
- Estándares y normativas.



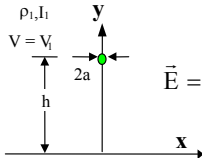
Campos Eléctricos. (I)

- Se producen por una o varias cargas eléctricas
 - Se define en términos de la fuerza que experimenta una unidad de carga estacionaria situada en un punto.
 - La fuerza entre dos cargas. Ley de Coulomb.
- Intensidad de campo eléctrico E (V/m) proporcional:
 - a la carga (superposición cargas) o la tensión.
 - inversamente al cuadrado de la distancia.
- Cálculo del campo en líneas eléctricas.

$$E = F / q$$

$$\vec{F} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cdot \hat{r}$$

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \sum_n \frac{q_n}{r_n^2} \hat{r}_n$$



$$\vec{E} = \frac{-V_l}{2 \ln(2h/a)} \cdot \ln \left[\frac{2(y+h)\vec{u}_y + 2x\vec{u}_x}{(y+h)^2 + x^2} - \frac{2(y-h)\vec{u}_y + 2x\vec{u}_x}{(y-h)^2 + x^2} \right] \text{ v/m}$$

El campo eléctrico producido por un conjunto de conductores en cada punto se obtiene como la suma vectorial de las intensidades de campo de cada uno de los conductores.



Campos Eléctricos. (II)

- Cálculo del campo eléctrico en general.
 - Resolviendo la ecuación de Laplace para el potencial y aplicando el gradiente, o por superposición vectorial de los campos producidos por las distribuciones de carga.
 - La introducción en un campo de cualquier material conductor o dieléctrico, causa una perturbación del campo cerca y dentro del material.
 - Existencia de un campo eléctrico natural (estático), creado por las cargas eléctricas presentes en la ionosfera, desde 100-400 V/m en condiciones de buen tiempo, hasta 20.000 V/m en condiciones de fuerte tormenta
- Los campos eléctricos comúnmente utilizados son sinusoidales.
 - Magnitud del campo eléctrico. $E = E_0 \text{ sen } \omega t$

– Valor eficaz: $E_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T E^2 dt}$

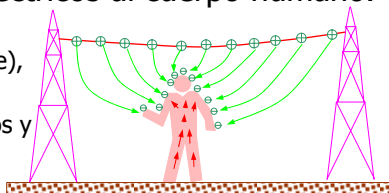
$$E_{\text{rms}} = \frac{E_0}{\sqrt{2}} = 0,707 \cdot E_0$$



Campos Eléctricos. (III)

- Acoplamiento de los campos eléctricos al cuerpo humano.

- Existencia de cargas eléctricas libres (sobre todo, en fluidos como la sangre),
- Un campo eléctrico hace que éstas se muevan, creando o induciendo campos y corrientes eléctricas en el interior del organismo.



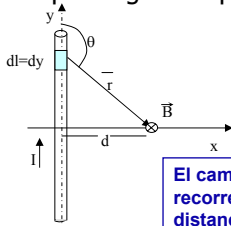
- Una intensidad de campo eléctrico exterior de 10 kV/m, pasa a ser en el interior del cuerpo de 400 mV/m. En la membrana de las células (tienen mayor resistividad) queda reducida a 1 V/m.
- La magnitud de las corrientes inducidas en la cabeza de una persona expuesta a niveles de campo de 10 kV/m es de 0,5 mA/m².
- Las corrientes naturales dentro de un organismo oscilan entre 1 y 10 mA/m². El umbral para producir claramente efectos nocivos es 100 mA/m², pero en el rango de 10 a 100 pueden producirse alteraciones biológicas no necesariamente nocivas.



Campos Magnéticos. (I)

- Se producen por cargas en movimiento (corrientes), o por imanes
 - Se define por la fuerza que se ejerce sobre un elemento de corriente en un punto
- Intensidad de campo magnético H (A/m)
 - **Inducción magnética** o densidad de flujo (Teslas, o Gauss). $B = \mu H$
 - Permeabilidad $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ henrios/metro
 - **1 $\mu T = 10$ mG**
 - Ley de Biot y Savart
- Campo magnético producido por la corriente en un conductor.

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}$$



$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{d}{(y^2 + d^2)^{3/2}} dy$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi d}$$

El campo magnético es proporcional a la corriente que recorre un conductor, e inversamente proporcional a la distancia al mismo.



Campos Magnéticos. (II)

- Campo magnético producido por dos conductores paralelos, con la misma corriente en sentido contrario.

$$\vec{B}_A = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_A} ; r_A = \left[d^2 + \left(\frac{a}{2} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\vec{B}_B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_B} ; r_B = \left[d^2 + \left(\frac{a}{2} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\vec{B}_T = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot a}{2\pi} \frac{1}{d^2 + \left(\frac{a}{2} \right)^2}$$

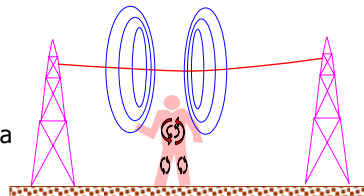
El campo magnético para dos conductores es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia al mismo.

- Cálculo del campo magnético en general.
 - Para valores de corriente específicos, se puede calcular el campo magnético usando la ley de Biot-Savart y superposición vectorial.
 - La introducción cualquier material conductor o dieléctrico, (una persona), no causa perturbaciones importantes cerca y dentro del propio material.
 - Para situaciones complejas (varios conductores y estructuras) campo mediante medidas o simulación



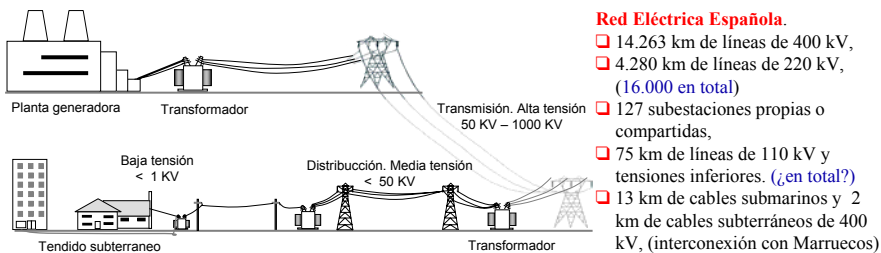
Campos Magnéticos. (III)

- Acoplamiento de los campos eléctricos al cuerpo humano.
 - Causa un flujo de cargas en un fluido conductor (tejidos humanos) en una dirección perpendicular a la dirección del campo y en función de la intensidad.
 - Se considera el campo magnético como la principal fuente de efectos biológicos y posibles efectos sobre la salud.
 - Un campo magnético variable de 100 μT genera en el cuerpo:
 - Campos eléctricos de 5 mV/m, tomando en la superficie celular o membrana un valor de 14 V/m. Sin embargo el campo fluctuante que aparece en las membranas celulares puede ser muy superior.
 - Unas densidades de corriente inducidas de 0,15 mA/ m².
 - En el cuerpo existen 20 mV/m naturales generados por el movimiento normal de iones en su interior, un fenómeno llamado "ruido térmico".
 - Existe un campo magnético natural estático debido a corrientes en el núcleo de la tierra. desde 25 μT en el ecuador magnético hasta 67 μT en los polos.



FUENTES DE CAMPOS ELECTROMAGNÉT. ELF

- **Redes eléctricas.** Electricidad en todas las facetas de la vida.

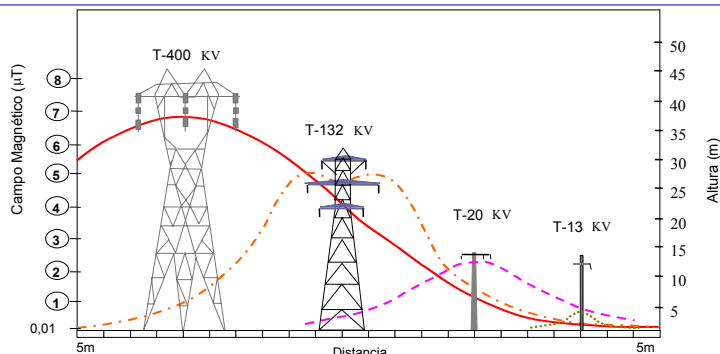


- Primeras investigaciones en los años 60 y 70 sobre trabajadores relacionados con el sector eléctrico o industrial.
- Estudio epidemiológico, [Wertheimer y Leeper en 1979] inicio del debate sobre la influencia de estos campos.
- La mayoría de los estudios no encuentran ninguna relación a los valores normalmente expuestos.
- Algunos estudios les atribuyen multitud de efectos, cáncer, abortos, Parkinson, alteraciones del sueño, etc.



Líneas eléctricas. (I)

- **Densidad de campo magnético para distintos tipos de líneas a 1 m sobre el nivel del suelo**

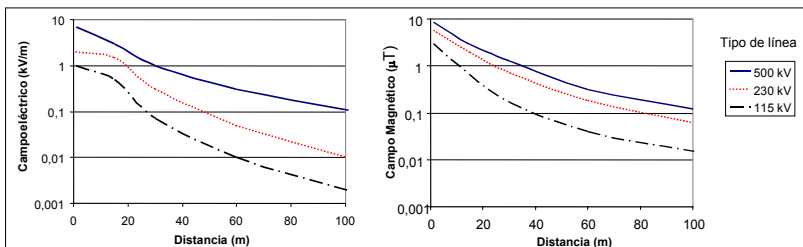


Tipo de línea	Debajo (1 m sobre el suelo)	15m	30m	60m	90m
115 kV	1,0 kV/m 2,97 μT	0,5 kV/m 0,65 μT	0,07 kV/m 0,17 μT	0,01 kV/m 0,04 μT	0,003 kV/m 0,02 μT
230 kV	2,0 kV/m 5,75 μT	1,5 kV/m 1,95 μT	0,3 kV/m 0,71 μT	0,05 kV/m 0,18 μT	0,01 kV/m 0,08 μT
500 kV	7,0 kV/m 8,67 μT	3,0 kV/m 2,94 μT	1,0 kV/m 1,26 μT	0,3 kV/m 0,32 μT	0,1 kV/m 0,14 μT

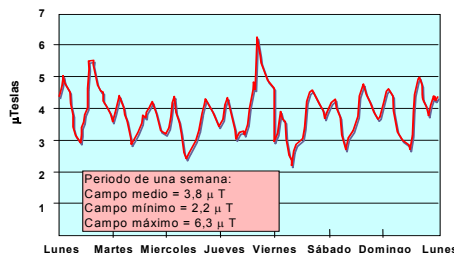


Líneas eléctricas. (II)

- Campos eléctrico y magnético en función de la distancia (1 m suelo).



El campo magnético tiene importantes variaciones temporales.



Campos en el hogar y en el trabajo.

- Existen multitud de equipos que generan campos electromagnéticos de cierta intensidad, especialmente campos magnéticos.
 - Valores relativamente altos en las cercanías de los equipos. Los niveles caen considerablemente al alejarnos de ellos.
 - Grandes variaciones en un mismo tipo de equipo (diseño, aislamiento).

APARATO	Campo magnético (μ T)		
	10 cm	30 cm	1 m
Frigorífico	0,06	0,05	0,02
Afeitadora	0,24	0,01	0,01
Cocina eléctrica	0,29	0,11	0,03
Reloj despertador	0,59	0,23	0,03
Secador de pelo	1,34	0,20	0,01
Televisor	1,40	0,50	0,09
Acondicionador aire	1,80	0,38	0,12
Aspiradora	5,16	1,52	0,31
Lampara Halógena	10,64	1,42	0,14
Lavadora	16,14	8,20	2,38
Acometida eléctrica	16,82	9,52	2,76
Microondas	30,04	6,04	0,61
Compresor	3,18	0,54	0,05
Taladro Portátil	34,56	7,10	0,89
Montacargas	38,72	2,96	0,50
Piedra esmeril	56,32	10,24	0,98
Máquina de soldar	564,00	191,00	78,40

Algunas máquinas
 C. Magnético > 100. μT
 C. Eléctricos 5 KV/m .

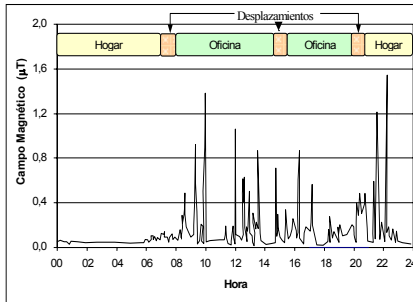
En medicina.
 Resonancia Nuclear Magnética hasta 2.000.000 μT

En ferrocarriles.
 Valores de hasta 100 μT.

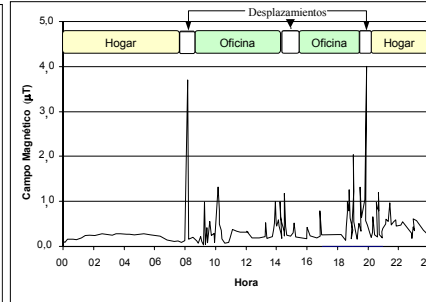


Exposición personal a campos ELF

- Caracterización de la exposición de individuos y grupos a CE y CM
 - Gran variabilidad en un día y entre promedios para diferentes días.
 - Dosimetría. *Dosis o exposición a un agente que produce un efecto biológico.*
 - *Time Weighted Average* (TWA) Media ponderada temporalmente del flujo de campo magnético



Persona en ambiente doméstico y de oficina normal



Persona que trabaja en un terminal de ordenador y que, además, vive cerca de una línea de 220 kV

Densidad de campo magnético de 50 Hz en un período de 24 horas



Instrumentación (I)

- Equipo comercial de gama baja.
 - 0 a 1999 nT a una frecuencia de 40 a 60 Hz.
 - Resolución: 1 nT.
 - Tolerancia del 5 %.
 - Medición en un eje.
 - Funciona con una pila de 9 V.
 - Tamaño: 6,5 x 11,5 x 2,7 cm.
- Equipo comercial de gama alta.
 - Medidas isotrópicas (no direccionales).
 - 5 nT a 10 mT y de 0,1 V/m a 100 kV/m
 - valores eficaces verdaderos de pico.
 - Detección espectral de componentes.
 - Contador de frecuencia incorporado
 - Filtro definible por el usuario
 - Medidas automáticas



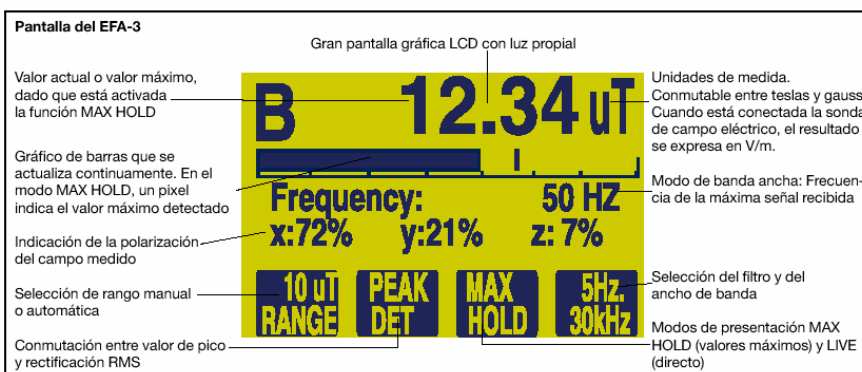
Instrumentación (II)

- Equipo comercial de gama alta.



Instrumentación (III)

- Pantalla de un equipo para la medida de campos electromagnéticos ELF.



SISTEMAS DE RADIOCOMUNICACIÓN.



SISTEMAS DE RADIOCOMUNICACIÓN

- Radiocomunicación:
 - Toda telecomunicación transmitida por ondas radioeléctricas.
 - Ondas radioeléctricas, ondas hertzianas;
 - Onda electromagnética, que se propaga por el espacio sin guía artificial y cuya frecuencia es inferior a 3 000 GHz.
- Sistemas de radiocomunicación:
 - Radioenlaces, por satélite, radiodifusión (AM, FM TV)...
 - Móvil terrestre, aeronáutico, privados, celulares..
 - Teléfonos inalámbricos, telemandos, WLAN ...
 - Diferentes bandas de frecuencias.
 - Diferentes potencias: desde mW hasta MW.
 - Diferentes tamaños de antenas (cm-decenas metros).
- Crecimiento exponencial en los últimos años.
 - Movilidad = ¿Necesidad social en el 1^{er} mundo?.
 - Influencias biológicas.
 - ¿Riesgo para la salud?.
 - Sistemas tradicionales: Radio y TV no han generado alarma.
 - Sistemas móviles: Si han generado controversia.
 - **Rápida expansión.**
 - **Ubicación en las azoteas de las viviendas.**



Sistemas de Comunicaciones Móviles.

- Sistemas privados:
 - Número reducido de estaciones. Pocos usuarios.
- Sistemas públicos de comunicaciones móviles:
 - GSM 900, dos operadores, también en la banda de 900 MHz.
 - GSM (DCS) 1800, tres operadores en la banda de 1800 MHz.
 - UMTS, cuatro operadores, en la banda de 2 GHz. Dos en operación
- Estructura celular dividida en sectores.
 - Elevado número de estaciones base para cubrir un área grande.
 - Necesidades de cobertura.
 - Densas redes de estaciones base.
 - Necesidades de capacidad: Especialmente en las zonas urbanas donde el número de posibles usuarios es muy elevado.
 - Las EB no pueden colocarse alejadas de los municipios.
 - No se podría dar servicio a todos los usuarios. Capacidad
 - El móvil tendría que transmitir con la máxima potencia. Cobertura



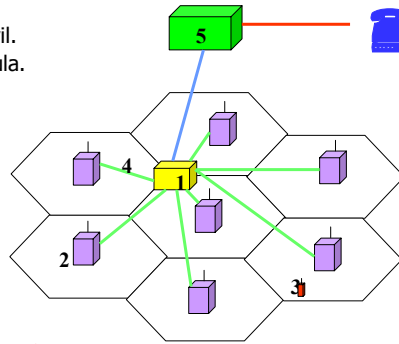
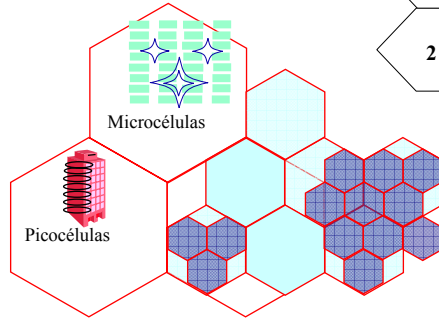
Sistemas Celulares.

- Distintos tipos de celdas y coberturas.
 - **Macrocéulas rurales:** Radios entre 5 y 35 Km, situadas en torres.
 - **Macrocéulas urbanas:** Radios de 1 a 3 Km. Mástiles en edificios.
 - **Microcéulas:** Coberturas entre 100 m y 1 Km. Normalmente situadas por debajo de la altura de los edificios.
 - **Picocéulas:** Coberturas hasta un centenar de metros y situadas habitualmente en interiores de edificios.



Sistemas Celulares.

- Constitución del sistema básico:
 - 1.MSC: Central de conmutación móvil.
 - 2. Estaciones base (BS) en cada célula.
 - 3. Unidades móviles.
 - 4. Enlaces.
 - 5. Central de telefonía fija.
- División de células



Ejemplo de Planificación Celular.

- **Ciudad media:**
 - Superficie de la zona a cubrir: **90 Km²**.
 - Número de habitantes en la zona: **170.000**.
- Suponemos un índice de penetración de la telefonía móvil del 80%, y un operador con un porcentaje del 40 %,
 - Número de móviles a dar servicio será de: **54.400 móviles**.
 - La densidad de móviles será: **605 móviles /Km²**.
 - Con 3 portadoras por sector y dos canales de señalización tendremos:
 - $3 \cdot 8$ (8 slots por portadora en GSM) $-2 =$ **22 canales de tráfico**.
 - Para un grado de servicio (GOS) del 1%, (99% de llamadas atendidas)
 - Número de móviles por sector a los que puede dar servicio será: **685**.
 - Area de cada uno de los sectores será de: **1.13 Km²**.
 - Area de la Célula (3 sectores): **3.4 Km²**.
 - **El número de células necesario será de = 27 BS.** (90 /3,4)



La prestación del servicio por el operador requiere el despliegue de **27 estaciones base**, que estarán separadas aproximadamente **2 Km**.



Estaciones Base.

- **Elevado impacto visual:**

- Varias Antenas de gran tamaño en BS de macrocélulas.
 - Sectorización y utilización de diversidad de espacio (no en **crospolares**).
 - Desde 130x20x5 cm hasta 200x40x10 cm.
- Los diagramas de radiación deben emitir tanto hacia los edificios, como a las calles existentes en el área de cobertura
- No permite el retranqueo con respecto al borde exterior de los edificios.

- **Las BS utilizan potencias de transmisión medias.**

- Menos de 1 W (30 dBm) para picoceldas hasta decenas de vatios por portadora para las macrocélulas.
- Con la ganancia de las antenas, valores de PIRE: 1 W (30 dBm)- **1 Kw.**
- Distancias de seguridad de algunos metros para el cumplimiento de las normas sobre exposición a campos electromagnéticos.

- Utilización de **radioenlaces** punto a punto para unir BS con MSC.

- Equipamiento adicional de telecomunicaciones. Aumento del impacto.
 - Utilización de **antenas pequeñas** (entre 30 y 60 cm de diámetro).
 - **Potencias bastante bajas** (entre 0 y 30 dBm).

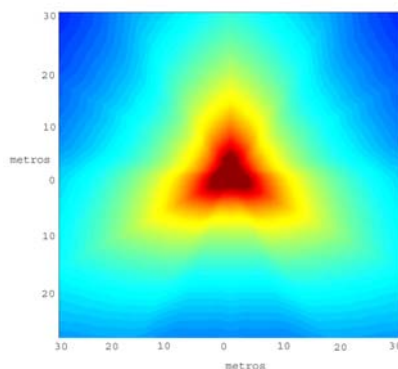


Niveles de exposición a campos EM.

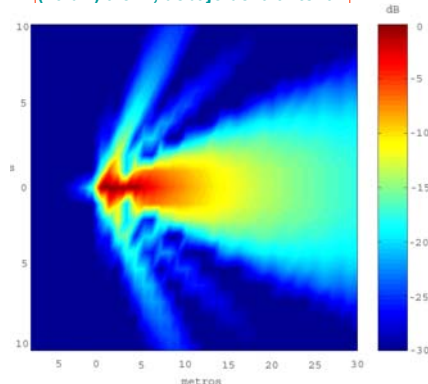
- **BS con una PIRE de 1 Kw por sector:**

- El límite de la normativa actual para exposición permanente:
 - 4,5 W/m², 9 W/m² y 10 W/m² para la bandas de 900 MHz, 1800 MHz y UMTS.
- Niveles de radiación por debajo de la norma en campo lejano.

Plano horizontal: Valores 10 veces (10 dB) a distancias de unos 10 m.



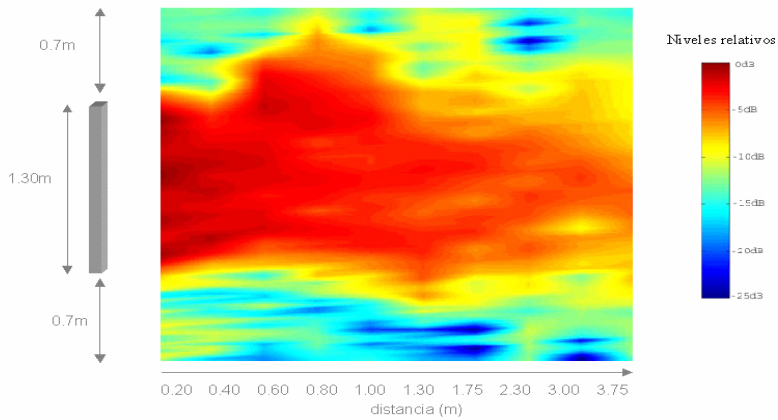
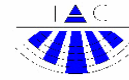
Plano vertical: Valores 100 veces (20 dB) a 5 m, debajo de la antena.



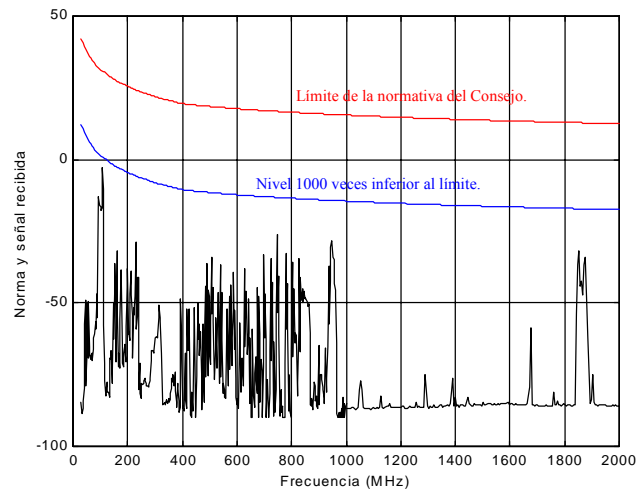
Niveles de exposición a campos EM.



RADIACIÓN VERTICAL DE UNA ANTENA DE TELEFONÍA MÓVIL EN LA BANDA DE 1800 MHz



ESPECTRO RADIOELÉCTRICO.

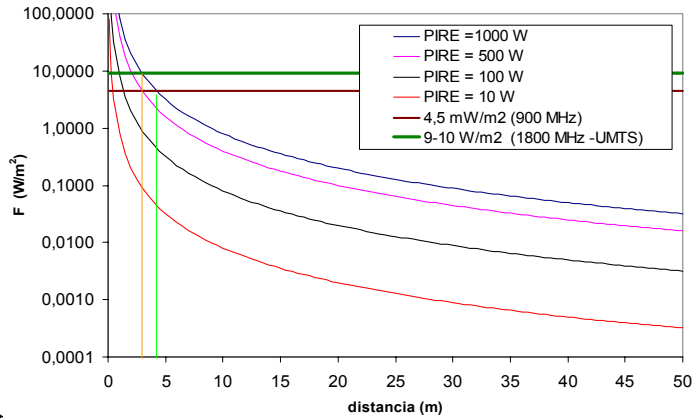


Niveles de exposición a campos EM.

- **Densidad de potencia con la distancia:**

- Espacio libre.
- Dirección máxima radiación.

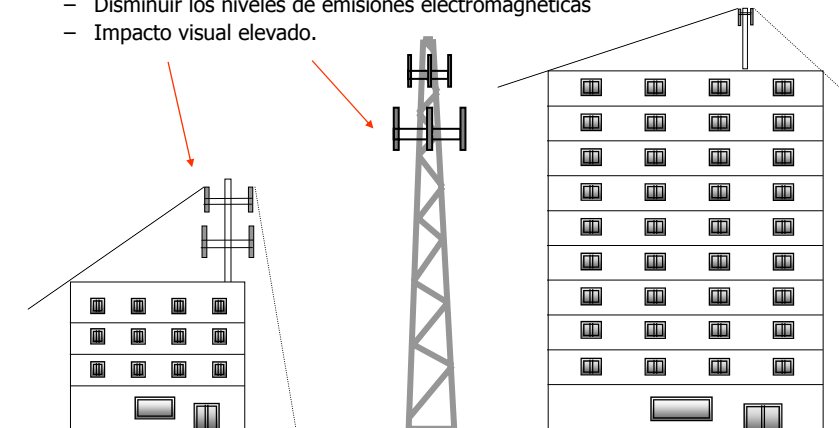
$$\Phi(\text{W}/\text{m}^2) = \frac{\text{PIRE}}{4\pi d^2}$$



Impacto visual.

- **Ejemplos típicos de ubicaciones de BS:**

- Radiar hacia los edificios y las calles en el área de cobertura de la célula.
- Disminuir los niveles de emisiones electromagnéticas
- Impacto visual elevado.



Compartición de emplazamientos.

- Posibilidades, influencia sobre los niveles de emisión e impacto visual:
 - **AZOTEAS:** Es factible.
 - Posibles problemas de bloqueos radioeléctricos o de acceso entre operadores.
 - Limitaciones en cuanto a distancias, ángulos,... conocidas por los operadores.
 - Limitación en cuanto al peso, tamaño, etc del equipamiento a instalar.
 - **MÁSTILES:** Solución problemática:
 - Mástiles más altos para poder separar unas antenas de otras.
 - Mayor grosor para soportar mayor peso. Aumento de impacto visual.
 - Problemática de acceso, seguridad, desactivación para mantenimiento.
 - Aparición de productos de intermodulación, desensibilización, ...
 - **ANTENAS:** Entorno competitivo.
 - ¿Quién es el propietario de las antenas?
 - ¿Existencia de operadores de infraestructuras, o de emplazamientos?



Equipos de medida (I).

Medidor de banda ancha. Bajas prestaciones.

Son dispositivos de medida portátiles, muy simples, utilizados fundamentalmente como protectores personales. Únicamente indican el porcentaje de campo respecto a una norma.

Las características básicas de estos equipos (RADMAN ESM-30) son las siguientes:

- 1MHz a 40GHz.
- Respuesta adaptada al ICNIRP 1998.
- Medida simultánea de campos E y H.
- 4 indicadores luminosos de nivel.
- Respuesta isotrópica (¿cuerpo?).
- Interfaz óptico para conexión con PC.



Equipos de medida (II).

Medidor de banda ancha.



Las Sondas de Banda Ancha nos dan una idea del nivel de campo electromagnético, sin especificar la frecuencia. Existen sondas de campo eléctrico y de campo magnético. Utilizado en la fase 1.

Permiten realizar medidas precisas de campos electromagnéticos, de forma sencilla y bajo diferentes condiciones de trabajo. Los elementos (EMR – 200/300) son:

- Unidad de procesado. Analiza y almacena los valores obtenidos.
- Sonda Isotrópica. Capta el valor del campo independientemente de la orientación y define la banda.
- Interfaz óptico,



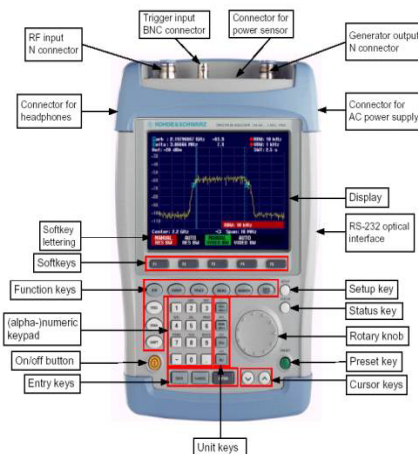
Equipos de medida (III).

Medidor de banda estrecha.

El Analizador de Espectros es un equipo de uso más complejo. Proporciona el nivel exacto, así como la frecuencia. Es el que debe utilizarse para realizar las medidas en la fase 2

Consideraciones:

- Utilización compleja:
 - Filtros.
 - Detectores.
- Uso de ANTENAS (Banda)
- Utilización de cables.
- Suma de las emisiones.
- Promediado temporal (6 m.)
- ¿Campo lejano?



Efectos biológicos (I).

Exposición Estación base – Móvil.

ANTENAS

- Cuerpo completo
- Prolongada
- Long. Onda \ll distancia:
Expos. Campo Lejano
- Fácil estimación y medición
en el "aire" (**mW/cm²**)

TELÉFONO

- Localizada
- Corta
- Long. Onda \geq distancia:
Expos. Campo Próximo
- Difícil estimación
 - E. Absorbida → Efecto
 - **SAR**: Func. Tejidos

Efectos biológicos.

- No pruebas de carcinogénesis (pocos datos?)
- Efectos neurofisiológicos: no concluyentes
- Efectos neuroestimuladores: **SÍ**, ante señales intensas (teléfono).
Fisiológicos, reversibles, sin relevancia, pero ¿efectos no térmicos?
- BTS: emisiones muy débiles; no evidencia de nocividad.



Efectos biológicos (II).

Conclusiones del CEI (Comité de expertos independientes)

- "Revisada la abundante información científica... el Comité concluye que el cumplimiento de la Recomendación (CMSUE, 1999) es suficiente para garantizar la protección de la población" **(C.1)**
- Para CEM infra-CMSUE se han descrito respuestas biológicas, no demostrativas de efectos nocivos. Pocos datos epidemiológicos sobre efectos de RF a largo plazo. **(C. 2)**
- "A las frecuencias, potencias y distancias actuales basadas en los criterios CUE, las antenas de TM no parecen representar un peligro para la salud pública. Las evidencias tampoco indican asociación entre el uso de los móviles y efectos adversos" **(C. 5)**

Recomendaciones del CEI.

- Garantizar** el cumplimiento de restricciones a exposición.
- Evaluación** independiente (CEI) y permanente de la evidencia científica.
- Control Exposición** en usuarios y espacios sensibles.
- Control Percepción riesgo**: Reducción Impacto Visual.
- Investigación** biomédica: Tecnologías presentes y previstas.
- Información** independiente, puesta al día, para distintos sectores sociales.



Referencias.

- Organización Mundial de la Salud (O.M.S.). Ginebra, Suiza
 - *Extremely low frequency (ELF) fields*. Environmental Health Criteria 35.
 - *Magnetic fields*. Environmental Health Criteria 69.
 - *Campos de frecuencia extremadamente baja y el cáncer*. Hoja N° 263
- R. Olsen and P. Wong. *Characteristics of Electromagnetic Fields in the Vicinity of Electric Power Lines*. IEEE Trans., Vol. PWRD-7, pp. 2046–2055, Oct. 1992.
- De Moerloose, J; Dawson, TW; Stuchly, MA. *Application of the finite difference time domain algorithm to quasi-static field analysis*. Radio Science. 32:329-341. 1997.
- Wertheimer N, Leeper E. *Electrical wiring configurations and childhood cancer*. American Journal Epidem. 1979; 109:273-284.
- *Campos eléctricos y magnéticos de 50 Hz. Análisis del estado actual de conocimientos*, Red Eléctrica Española (REE). 1998.
- Preece AW, et al. *Magnetic fields from domestic appliances in the UK*. Phys Med Biol 1997; 42:67-76.
- Zaffanella, L.E., and G.W. Kalton. *Survey of Personal Magnetic Field Exposure*. RAPID Engineering Project #6. EMF Research Program. U.S. Department of Energy. 1998.
- *Material Based Magnetic Field Shielding Design Guide*, EPRI Report TR-109271, 1997.
- IEEE Std 1308-1994. *Recommended Practice for Instrumentation Specifications for Magnetic Flux Density and Electric Field Strength Meters - 10 Hz to 3 kHz*. NY. 1994.



Enlaces.

- **American Industrial Hygiene Association**. www.aiha.org
- **American Medical Association**. www.ama-assn.org
- **American National Standards Institut (ANSI)**. www.ansi.org
- **American Public Power Association**. www.appanet.org
- **Archivos del Grupo de Noticias EMF-BIO**. www.bio.net/hypermail/EMF-BIO.
- **Base de Datos de Medidas de Campos Electromagnéticos.** www.emf-data.org
- **Bioelectromagnetics Society (BEMS)**. www.bioelectromagnetics.org
- **Internat. Commis. on Non Ionizing Radiation Protection (ICNIRP)**. www.icnirp.de
- **Medical College of Wisconsin**, www.mcw.edu/gcrc/cop
- **National Cancer Institute**, www.nci.nih.gov
- **National Institute of Environmental Health Sciences** www.niehs.nih.gov/emfrapid
- **National Radiological Protection Board (NRPB)** www.nrbp.org.uk/Nir-is.htm
- **Organización Mundial de la Salud (O.M.S.)**. www.who.ch/peh-emf/index.htm

Empresas Eléctricas

- **Electricity Supply Association of Australia (ESAA)**. esaa.com.au
- **Electric Power Research Institute (EPRI)**, www.epri.com
- **Edison Electric Institute (EEI)**, www.eei.org/issues/enviro/emfinfo.htm
- **Electricity Association**, www.ea.org
- **Red Eléctrica Española (REE)**. www.ree.es

