

# “Efectos de las Radiaciones Electromagneticas

DIEGO PABLO RUIZ PADILLO  
DPTO. FÍSICA APLICADA  
UNIVERSIDAD DE GRANADA  
958244161  
DRUIZ@UGR.ES

## RADIACIÓN

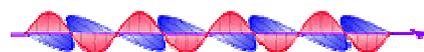
2

Partículas



Radiación:  
Emisión de energía

Ondas electromagnéticas



# ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Cargas



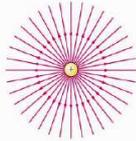
Campo eléctrico

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_o}$$

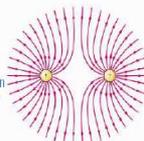


SE MIDE EN V/m

1. Las líneas de campo son tangentes en todo punto al vector campo en dicho punto

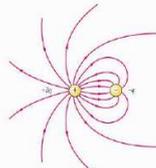
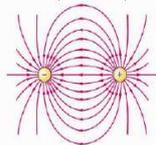


2. Las líneas de campo salen de una carga positiva y entran en una carga negativa



3. El número de líneas que salen o entran en una carga es proporcional a la magnitud de la carga

4. Dos líneas de campo nunca se pueden cruzar



5. La densidad de líneas (número de líneas por unidad de área perpendicular a las mismas) en un punto es proporcional al valor del campo en dicho punto

Potencial en un punto es la energía potencial por unidad de carga en dicho punto

$$V = \frac{Ep}{q_o} \quad \text{Unidad: Voltio}$$

$$1 V = 1 \frac{J}{C}$$

Relación entre la diferencia de potencial y el campo eléctrico

$$dV = -\vec{E} \cdot d\vec{r}$$

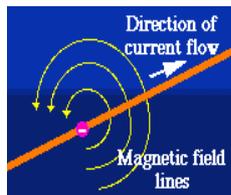
$$\vec{E} = -\frac{dV}{d\vec{r}}$$

Las líneas de campo señalan la dirección en la que el potencial disminuye

# ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

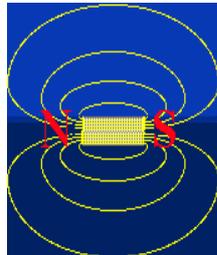
4

Corrientes



Campo magnético

Imanes



# ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

5

Cambios en el campo magnético

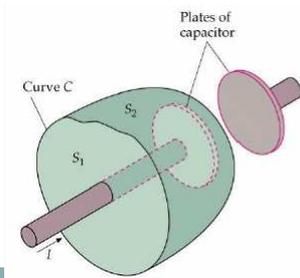


Campo eléctrico

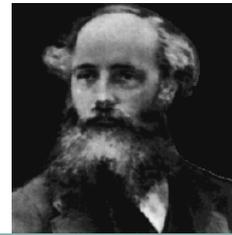
Cambios en el campo eléctrico



Campo magnético



$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I + \epsilon_0 \mu_0 \frac{d}{dt} \iint_S \vec{E} \cdot d\vec{S}$$



# ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

6

Cambios en el campo magnético

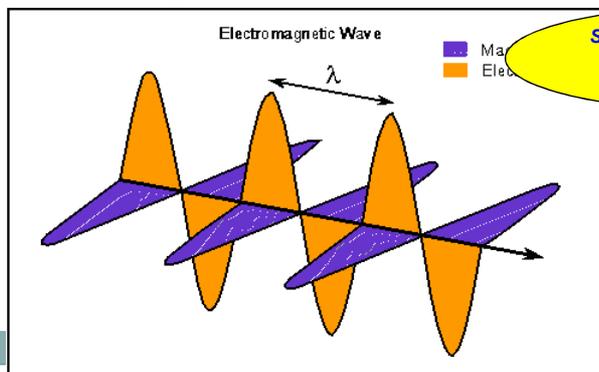


Campo eléctrico

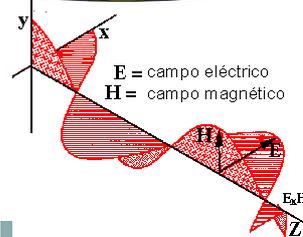
Cambios en el campo eléctrico



Campo magnético



SE DICE QUE EN ESA REGIÓN HAY UN CAMPO ELECTROMAGNÉTICO



# ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS (planas)

- Las ecuaciones de Maxwell aplicadas a campo E y B ortogonales que se propagan en la misma dirección (ej. x) admite soluciones tipo onda.

$$c^2 \frac{\partial^2 E(x,t)}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 E(x,t)}{\partial t^2} \rightarrow E(x,t) = E_0 \text{ sen} [\omega t - kx]$$

$$c^2 \frac{\partial^2 B(x,t)}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 B(x,t)}{\partial t^2} \rightarrow B(x,t) = B_0 \text{ sen} [\omega t - kx]$$

No son independientes → Satisfacen Maxwell

$$E_0 = cB_0$$

# ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

8

Longitud de onda

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

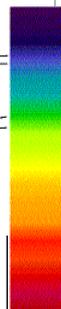
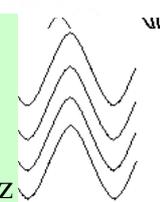
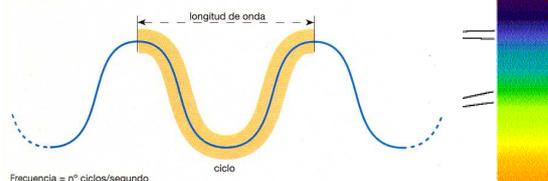
$$E = hf$$

$\lambda$  = longitud de onda

$c$  = velocidad de la luz =  $3 \cdot 10^{10} \text{ cm/s}$

$h$  = constante de Planck =  $6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$

$f$  = frecuencia. Se mide en Hz, MHz, GHz



## ENERGÍA DE UNA OEM

- Densidad de energía eléctrica y magnética

○ Vacío

$$u_e = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$$

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

- Medio

$$u_e = \frac{1}{2} \epsilon E^2$$

$$u_m = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu}$$

- Densidad de energía de la OEM

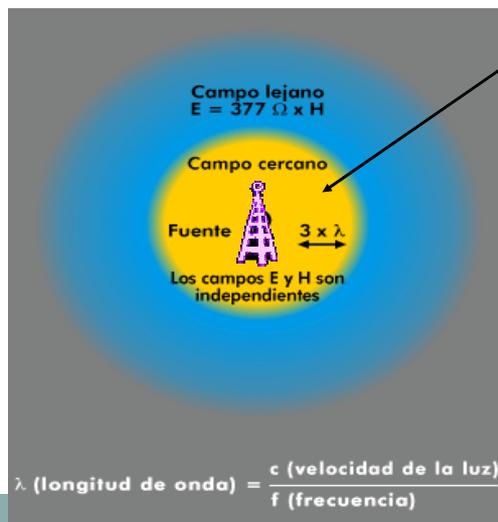
$$E_0 = cB_0$$

$$u = u_e + u_m = \frac{1}{2} \epsilon E^2 + \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu}$$

$$u = \epsilon E^2 = \frac{B^2}{\mu}$$

## ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

¿Cómo son los campos eléctricos y magnéticos?



Cerca de la antena: campo cercano

E y H desacoplados y no en fase. Puede haber un campo E intenso y H débil y viceversa

Límite campo cercano-campo lejano

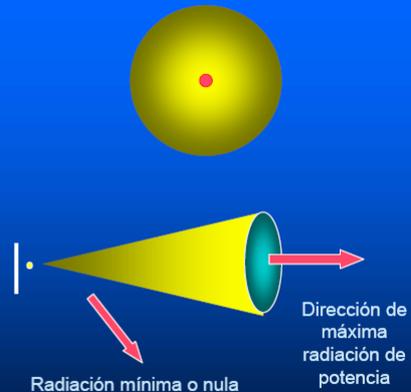
$$R = 3\lambda$$

$$\lambda \text{ (longitud de onda)} = \frac{c \text{ (velocidad de la luz)}}{f \text{ (frecuencia)}}$$

## ENERGÍA QUE RADIA UNA ANTENA

Una antena emite energía de radiofrecuencia de manera semejante a una lámpara.

La energía que emite una antena se concentra en una porción limitada del espacio. Esta capacidad de concentración está determinada por la **ganancia** de la antena.



En el espacio libre, la densidad de flujo de potencia disminuye proporcionalmente al recíproco del cuadrado de la distancia a la antena:

$$S = \frac{\text{Potencia radiada por la antena}}{4\pi d^2} F(\theta, \phi)$$

## ENERGÍA QUE RADIA UNA ANTENA

La densidad de flujo de potencia y la intensidad de campo eléctrico están relacionadas:

$$E = \sqrt{S \times Z}$$

**Z** es la impedancia característica del medio en que se propaga la onda y depende de las características eléctricas de éste. Vale 377 ohms para el espacio libre.

En cualquier medio material (agua, tejido vivo, etc.) la energía se atenúa según las características del medio. Esto equivale a decir que la onda cede energía al medio, o bien que el medio absorbe parte de la energía de la onda.

## ENERGÍA QUE RADIA UNA ANTENA

Un parámetro que se utiliza para medir la absorción de energía por el tejido biológico es la **tasa de absorción específica o SAR** (Specific Absorption Ratio) que da la energía absorbida por unidad de masa:

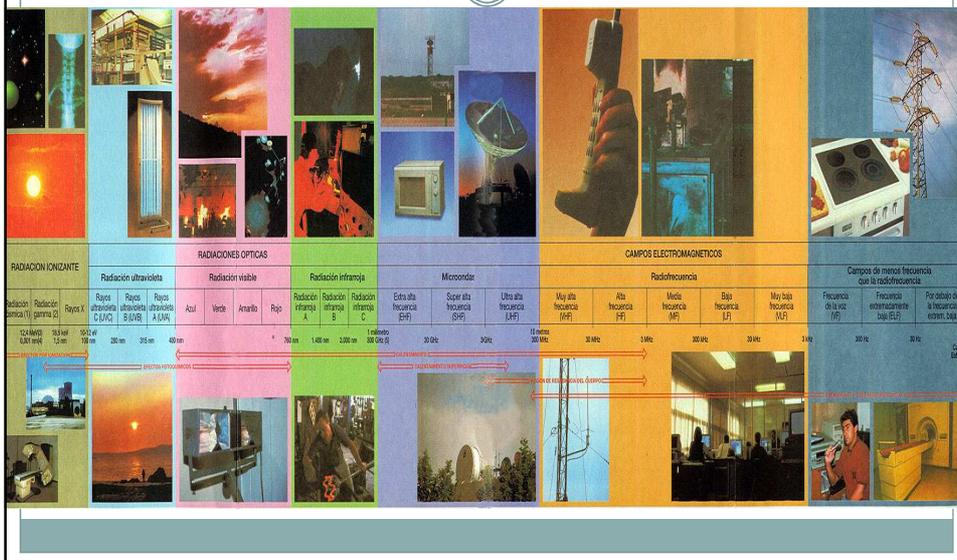
$$SAR = \frac{E^2 \sigma}{\rho}$$

$\sigma$  es la **conductividad eléctrica del tejido** y  $\rho$  es la **densidad (Kg/m<sup>3</sup>)**.

**El tejido vivo del cuerpo humano no es homogéneo y tampoco es uniforme. Las fórmulas anteriores sólo dan una primera aproximación.**

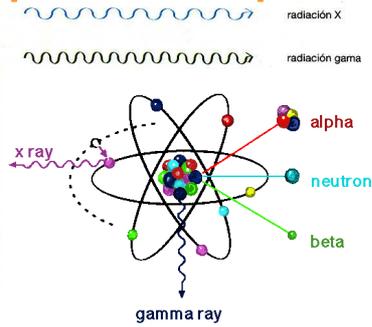
## EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

14

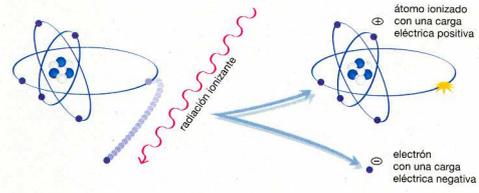


## RADIACIONES IONIZANTES Y NO IONIZANTES

Pueden arrancar electrones y provocar reacciones químicas

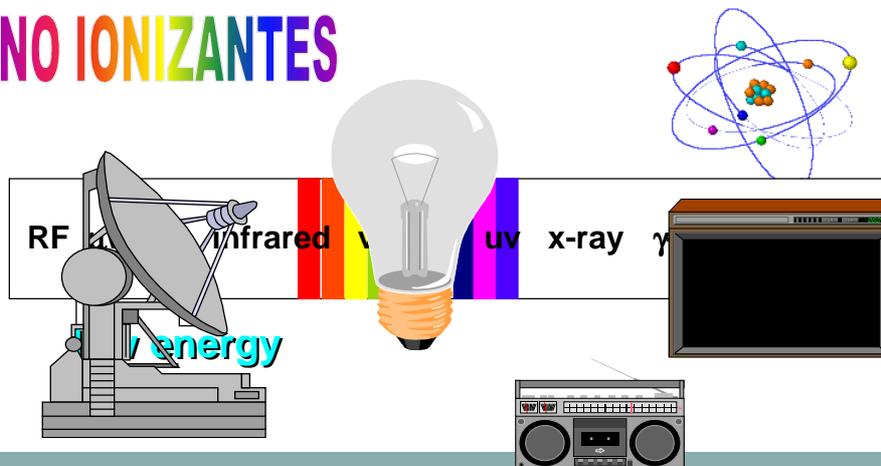


# IONIZANTES



## RADIACIONES IONIZANTES Y NO IONIZANTES

# NO IONIZANTES



## ENERGÍA DE UNA ONDA ELECTROMAGNÉTICA (FOTÓN)

$$w = hf$$

$$h = 6.6252 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{seg.} = 4.14 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{seg}$$

f = frecuencia en Hz.

### Energía mínima necesaria para producir ionización

Es la energía necesaria para liberar un electrón de un átomo

La energía mínima es del orden de 4 eV

La frecuencia de un fotón de esta energía es:

$$f = 4 \times 1,6 \times 10^{-19} / 6,625 \times 10^{-34} = 9,66 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

Esta frecuencia corresponde aproximadamente al **ultravioleta lejano**

La energía de un fotón de 300 GHz (radiofrecuencia) es de 0,00125 eV, es decir, una diezmilésima de la mínima energía necesaria para producir ionización.

**La energía de radiofrecuencia no puede producir  
ionización**

## Radiación GAMMA (IONIZANTE)



Suelen tener su origen en el núcleo excitado. A menudo, tras emitir una partícula alfa o beta, el núcleo tiene todavía un exceso de energía, que elimina en forma de ondas electromagnéticas de elevada frecuencia.

Como todas las demás formas de radiación electromagnética, estas ondas no tienen masa ni carga, e interaccionan con la materia colisionando con las capas electrónicas de los átomos con los que se cruzan, perdiendo muy lentamente su energía, por lo que pueden atravesar grandes distancias.

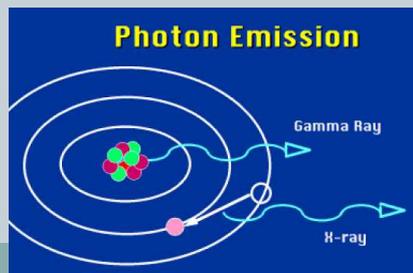
## Radiación X (IONIZANTE)



*Los rayos X se producen por:*

- Interacción de las partículas cargadas eléctricamente y la materia. (chorro de electrones acelerados con una placa metálica)*
- Un electrón de las capas externas cae a una órbita más interna.*

*Los rayos X se producen por procesos externos al núcleo atómico.*



## **Algunos efectos de la radiación ionizante en las células**

### **Muerte celular**

### **Pérdida de capacidad reproductiva**

**Daños al código genético (ADN):** Las futuras copias de la célula quedarán alteradas.

Las células que se multiplican rápidamente son las más susceptibles de ser afectadas por la radiación. Por ejemplo las células del feto y las células cancerosas.

Las células tienen cierta capacidad de autoreparación, pero ésta debe ocurrir antes de que la célula se reproduzca para que no haya efectos nocivos

---

## **INDUSTRIA**

- ✓ *Control de Calidad de Soldaduras*
  - ✓ *Prospección Petrolera*
  - ✓ *Control de Niveles, Densidad, Compactación*
  - ✓ *Control de Calidad de Productos: Cigarrillos, Cemento, etc.*
  - ✓ *Irradiación de Alimentos*
  - ✓ *Esterilización de Productos*
  - ✓ *Fraccionamiento de Radioisótopos*
-

---

## EFFECTOS BIOLÓGICOS DE LAS RADIACIONES

### CLASIFICACIÓN (A QUIENES AFECTAN)

- ✱ Somáticos.  
No se transmiten hereditariamente.
- ✱ Genéticos.  
Se transmiten hereditariamente.

---

## EFFECTOS BIOLÓGICOS DE LAS RADIACIONES

### CLASIFICACIÓN (RELACIÓN DAÑO DOSIS)

➤ *No Estocásticos.*

*La gravedad depende de la dosis. Están directamente relacionados con la cantidad de la radiación recibida, con lo que el efecto es más severo cuanto mayor sea la dosis, por ejemplo, las quemaduras. Típicamente tienen una dosis umbral, por debajo de la cual, se estima que el efecto nocivo no aparece.*

➤ *Estocásticos.*

*La gravedad no depende de la dosis. Ocurren al azar, por lo que no tienen umbral y su efecto puede aparecer independientemente de la dosis recibida. Al estar basados en probabilidades, la posibilidad de aparición del efecto aumenta con el incremento de las dosis. Un ejemplo es la mayor incidencia de cáncer.*

---

---

### EFFECTOS NO ESTOCÁSTICOS

- ✓ La severidad del efecto varía con la dosis existiendo un umbral para éllo.
  - ✓ Algunos efectos son somáticos y específicos para algunos tejidos.
  - ✓ Se manifiestan siempre que la dosis recibida alcanza o sobrepasa cierto valores y no aparecen nunca en caso contrario.
- 

## Radiación Ultravioleta



Los rayos UV se encuentran ubicados entre los rayos X y el espectro visible con longitudes de onda entre 10 nm y 380 nm .

- Estos rayos se subdividen en:

UV cercanos (380 a 200 nm), y

UV extremos (200 a 10 nm).

El aire es ampliamente opaco al rango extremo y el oxígeno lo absorbe.

Una parte de estos rayos que tienen muy alta frecuencia se comporta como radiación ionizante.

## Radiación Ultravioleta

- **En términos de impacto ambiental y de salud humana, estos rayos se subdividen en:**

**UV-A (380 a 315 nm),  
UV-B (315 a 280 nm) y,  
UV-C (280 a 100 nm).**

**El UV-A llega a la tierra y hace poco daño a los tejidos.**

**El UV-B es el responsable de las quemaduras y cáncer a la piel, pero es absorbido por el ozono. El UV-C es llamado “germicida” y es absorbido por el ozono estratosférico a 35 Km de altitud.**

## Radiación Ultravioleta

- **Fuentes de generación:**

**Exposición solar**

**Lámparas germicidas**

**Lámparas de fototerapia**

**Televisores antiguos**

**Lámparas solares UV**

**Arcos de soldadura**

**Fotocopiadoras**

## Radiación Ultravioleta

- **Efectos biológicos de los RADIACIÓN ULTRAVIOLETA:**

Se limitan a la piel y los ojos y van a depender de la longitud de onda de la radiación y el grado de pigmentación de la piel de la persona expuesta.

En pieles más pigmentadas la penetración es menor por lo tanto el riesgo disminuye. Las lesiones en la piel más frecuentes pueden ser oscurecimiento, eritema (irritación), pigmentación retardada, interferencia en el crecimiento celular, etc.

En los ojos se produce fotoqueratitis o fotoquerato conjuntivitis.

## LUZ VISIBLE

- **Luz visible:** Es la pequeña parte del espectro electromagnético a la que es sensible el ojo humano.

$400 \text{ nm} < \lambda < 750 \text{ nm}$

Se producen por saltos electrónicos entre niveles atómicos y moleculares. Las longitudes de onda que corresponden a los colores básicos son:

- ROJO De 6200 a 7500 Ao
- NARANJA De 5900 a 6200 Ao
- AMARILLO De 5700 a 5900 Ao
- VERDE De 4900 a 5700 Ao
- AZUL De 4300 a 4900 Ao
- VIOLETA De 4000 a 4300 Ao

## Espectro Visible

- El **espectro visible** es la porción del espectro electromagnético que es visible para el ojo humano. La radiación electromagnética en este rango de longitudes de onda se le llama **luz visible** o simplemente luz. Es lo que hace la luz al pasar por un prisma, donde se divide en distintos colores. No hay límites exactos en el espectro visible; un típico ojo humano responderá a longitudes de onda desde 400 a 700 nm, aunque algunas personas pueden ser capaces de percibir longitudes de onda desde 380 a 780 nm.
- Los colores del espectro se ordenan como en el arco iris, formando el llamado espectro visible.



## Luz Visible

- **Fuentes de generación**
  - Exposición solar
  - Lámparas incandescentes
  - Arcos de soldadura
  - Lámparas de descarga de gases como neón, fluorescentes, etc.

- **Efectos biológicos**

La luz visible puede producir riesgos tales como: pérdida de agudeza visual, fatiga ocular, deslumbramiento debido a contrastes muy marcados en el campo visual o a brillos excesivos de las fuentes luminosas.

## Radiación Infrarroja

- La radiación infrarroja o radiación térmica es un tipo de radiación electromagnética de mayor longitud de onda que la luz visible, pero menor que la de las microondas.

- **Radiación infrarroja** Es emitida por cuerpos calientes y son debidas a vibraciones de los átomos.

$$10^{-3}\text{m} < \lambda < 10^{-7}\text{m}$$

- Su longitud de onda está entre 700 nm y 1 mm.
- Los infrarrojos se subdividen en:
  - infrarrojo cercano (0,8-2,5)  $\mu\text{m}$
  - infrarrojo medio (2,5-50)  $\mu\text{m}$
  - infrarrojo lejano (50-1000)  $\mu\text{m}$

## Radiación Infrarroja

- **Fuentes de generación:**
  - Exposición solar**
  - Cuerpos incandescentes**
  - Superficies muy calientes**
  - Llamas**
  - Lámparas incandescentes, fluorescentes, etc.**

## Radiación Infrarroja

### Efectos biológicos:

- **Efectos de tipo térmico.**
- **Las lesiones que puede producir aparecen en la piel y los ojos. La exposición a esta radiación puede causar quemaduras y aumentar la pigmentación de la piel.**
- **Los ojos están dotados de mecanismos que los protegen, pero se pueden producir eritemas, lesiones de la córnea y quemaduras.**

## Microondas ( $\mu O$ ) y Radiofrecuencias (RF)

- **Ubicación en el espectro**  
Entre los 3 KHz y 300 GHz.  
Aunque para las microondas se da el rango entre 300 MHz y 300 GHz.
- **Fuentes de generación**  
Estaciones de radio emisoras de radio y televisión  
Instalaciones de radar y sistemas de telecomunicación  
Hornos microondas  
Equipos de  $\mu O$  y RF utilizados en procesos como soldadura, fusión, esterilización, etc.

## Microondas

- Las microondas hacen vibrar o rotar las moléculas de agua, esta vibración crea calor, el cual calienta el tejido. Debido a que la materia está hecha básicamente de agua, se aprovecha esta propiedad para cocinar los alimentos fácilmente de esta manera.
- Las microondas son usadas en las telecomunicaciones porque éstas pasan fácilmente a través de la atmósfera con menos interferencia que otras longitudes de onda mayores.
- También hay más ancho de banda en el espectro de microondas que en el resto del espectro de RF.

## Microondas ( $\mu\text{O}$ ) y Radiofrecuencias (RF)

- **Efectos biológicos**  
Los efectos de las  $\mu\text{O}$  y RF dependen de la capacidad de absorción de la materia y de las intensidades de los campos eléctricos y magnéticos que se producen en su interior.
- El efecto principal es el aumento de la temperatura corporal.
- Los efectos biológicos exactos de las  $\mu\text{O}$  de bajos niveles no están del todo conocidos.

## Efectos Biológicos de las RF

Lógicamente, también influyen:

- La distribución de los campo E y M en el cuerpo.
- La geometría del tejido.
- Las propiedades dieléctricas del tejido.

Existe un parámetro que cuantifica la absorción de la energía de RF:

“Tasa de absorción específica” (SAR): [W/Kg]

## Efectos Biológicos de las RF: Cuando el calentamiento es peligroso

- **Criterios para la valoración de efectos térmicos**
- **Si el cuerpo se somete a un calentamiento externo igual o superior a la tasa metabólica, puede ocurrir daño por efectos térmicos.**
- La tasa metabólica basal del ser humano es del orden de 1 w/kg de masa corporal. Un individuo puede tolerar hasta 4 veces este valor durante períodos prolongados sin efectos apreciables.
- En condiciones de ejercicio físico, puede aumentar considerablemente (>15 w/kg)
- **Para producir una SAR de 1 w/kg se requiere una intensidad de campo eléctrico del orden de 30 V/m**

## Efectos Biológicos de las RF: Cuando el calentamiento es peligroso

- **Universalmente se acepta que una SAR inferior a 4 w/kg supone una disipación de calor comparable a la de una actividad física moderada y por tanto es autorregulable por el organismo.**
- Suponiendo una impedancia característica del tejido vivo como de  $45 \Omega$  ( $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$  y  $\sigma = 1 \text{ S/m}$ ), la densidad de flujo de potencia capaz de producir una intensidad de campo de 30 V/m será de  $20 \text{ w/m}^2$ .
- La densidad de flujo de potencia establecida por las normas de ICNIRP es la 5ª parte del valor anterior, para exposición del público en general.
- **La distancia a una antena que radia 1000 w, a la que se tiene una DFP de  $20 \text{ w/m}^2$ , es de ¡6 centímetros!**

## Efectos Biológicos de las RF: Cuando el calentamiento es peligroso

- **Hechos:**
  - Pueden inducirse cataratas en animales de laboratorio por la exposición a la RF
  - Se observa degeneración testicular en algunos animales de laboratorio
  - Unos años después se informa de un caso aislado de sangrado interno entre trabajadores de equipos de radar.
  - Los niveles de exposición de  $100 \text{ mW/cm}^2$  producían de manera consistente efectos adversos.
  - Por debajo de  $10 \text{ mW/cm}^2$  no se observaron efectos significativos.

## EN RESUMEN: EFECTOS BIOLÓGICOS DE RF MICROONDAS Y E.L.F.

- **Efectos demostrables de la RF sobre la salud humana:**
  - Solamente los efectos térmicos (aumento de temperatura), son claramente demostrables y bien conocidos.
  - Aunque se han demostrado algunos efectos biológicos de la RF a nivel celular, los efectos sobre la salud no están bien demostrados, con frecuencia son contradictorios y continúan siendo objeto de investigación, especulación y controversia.
- **Los riesgos de la RF, así como de las corrientes eléctricas están bien establecidos. Entre otros:**
  - Shock
  - Quemaduras
  - Fatiga térmica
  - Manifiestan umbrales bastante claros y, a diferencia de la radiación ionizante, no dependen de la exposición acumulada,
- **Dos tipos de umbral:**
  - Intensidad
  - Frecuencia

## RADIACIONES NO IONIZANTES Normativa

### LÍMITES DE EXPOSICIÓN A LAS EMISIONES RADIOELÉCTRICAS (Real Decreto 1066/2001)

RB: restricción básica.

*Restricciones básicas para campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos (0 Hz-300 GHz)*

Gama de frecuencia	Inducción magnética (mT)	Densidad de corriente (mA/m <sup>2</sup> ) rms	SAR medio de cuerpo entero (W/kg)	SAR Localizado (cabeza y tronco) (W/kg)	SAR Localizado (miembros) (W/kg)	Densidad de potencia S (W/m <sup>2</sup> )
0 Hz	40	—	—	—	—	—
>0-1 Hz	—	8	—	—	—	—
1-4 Hz	—	8/f	—	—	—	—
4-1.000Hz	—	2	—	—	—	—
1.000 Hz-100 kHz	—	f/500	—	—	—	—
100 kHz-10 MHz	—	f/500	0,08	2	4	—
10 MHz-10 GHz	—	—	0,08	2	4	—
10-300 GHz	—	—	—	—	—	10



# RADIACIONES NO IONIZANTES

## Normativa

### LÍMITES DE EXPOSICIÓN A LAS EMISIONES RADIOELÉCTRICAS (Real Decreto 1066/2001)

Niveles de referencia.

*Niveles de referencia para campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos (0 Hz-300 GHz, valores rms imperturbados)*

Gama de frecuencia	Intensidad de campo E (V/m)	Intensidad de campo H (A/m)	Campo B ( $\mu$ T)	Densidad de potencia equivalente de onda plana (W/m <sup>2</sup> )
0-1 Hz	—	$3,2 \times 10^4$	$4 \times 10^4$	
1-8 Hz	10.000	$3,2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^4/f^2$	
8-25 Hz	10.000	$4.000/f$	$5.000/f$	
0,025-0,8 kHz	$250/f$	$4/f$	$5/f$	—
0,8-3 kHz	$250/f$	5	6,25	—
3-150 kHz	87	5	6,25	—
0,15-1 MHz	87	$0,73/f$	$0,92/f$	—
1-10 MHz	$87/f^{1/2}$	$0,73/f$	$0,92/f$	—
10-400 MHz	28	$0,73/f$	0,092	2
400-2.000 MHz	$1,375 f^{1/2}$	$0,0037 f^{1/2}$	$0,0046 f^{1/2}$	$f/200$
2-300 GHz	61	0,16	0,20	10