

SALUD AMBIENTAL 2.0

MÓDULO 1. RADIACIONES NO IONIZANTES

En esta unidad...

1. Introducción al electromagnetismo
2. Radiaciones no ionizantes

Introducción

Si alguien nos pregunta “¿Qué es la radiación?” muchos de nosotros tendríamos que pensar algunos minutos antes de poder dar una respuesta clara y correcta, suponiendo que podamos hacerlo sin recurrir a la wikipedia. Los conceptos que nos suelen venir a la cabeza son rayos X, residuos radiactivos o mutaciones genéticas de terribles consecuencias.

Si además se trata de radiaciones no ionizantes el tema se complica: ¿qué significa que la radiación sea no ionizante? ¿Qué implicaciones tiene para la salud? Éstas son algunas de las preguntas que aprenderemos a responder a lo largo de este primer módulo *Radiaciones no ionizantes y salud*.

En este módulo vamos a recordar algunas ideas sobre electromagnetismo que quizá tengamos un tanto olvidadas: conceptos de campo eléctrico y magnético, unidades de medida y fenómenos como la inducción electromagnética o la Jaula de Faraday, que nos ayudarán a comprender cómo se comportan los campos electromagnéticos en presencia de la materia, ya sea viva o inerte.

Por último, se abordarán las radiaciones no ionizantes desde el punto de vista de sus posibles consecuencias sobre la salud humana, un aspecto sobre el que los científicos trabajan con el fin de esclarecer qué mecanismos intervienen tras una exposición, breve o prolongada, a este tipo de radiaciones.

1. Introducción al electromagnetismo

El **electromagnetismo** es una rama de la Física que estudia y unifica los fenómenos eléctricos y magnéticos en una sola teoría, cuyos fundamentos fueron sentados por Michael Faraday y formulados por primera vez de modo completo por James Maxwell. Describe los fenómenos físicos macroscópicos en los cuales intervienen cargas eléctricas en reposo y en movimiento.

Estos apuntes de introducción al electromagnetismo no pretenden ser exhaustivos, sino reflejar las características más relevantes en relación con las radiaciones electromagnéticas, facilitando unas nociones básicas al alumno sobre las que poder trabajar posteriormente.

CARGA ELÉCTRICA

La carga eléctrica es una propiedad intrínseca de la materia que se mide en culombios (C). Se trata de una magnitud escalar, es decir, que queda perfectamente definida por una cantidad numérica y las unidades en que se mide, sin necesidad de indicar dirección o sentido como en las magnitudes vectoriales. Podemos encontrar cargas de tipo positivo o negativo, y en el caso de que no existan cargas o éstas se compensen, diremos que un cuerpo es neutro.

En los átomos las cargas positivas (protones) y los elementos neutros (neutrones) se sitúan en el núcleo y las cargas negativas (electrones), alrededor de él (Fig.1). La carga elemental que encontramos en la naturaleza es la del electrón:

$$e = - 1,6 \cdot 10^{-19} \text{C.}$$

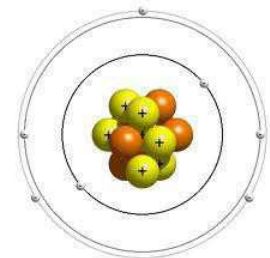


Fig 1. Esquema átomo

La carga de un protón es la misma, pero con signo positivo. Cuando un átomo es neutro tiene igual número de protones y electrones. Si modificamos el número de electrones arrancándolos o añadiéndolos, estamos ionizando el átomo, y éste queda cargado y pasa a denominarse ión. Dado que los electrones poseen carga negativa, un exceso de éstos supondrá una ionización negativa (anión), mientras que un defecto de electrones se traduce en una ionización positiva (catión).

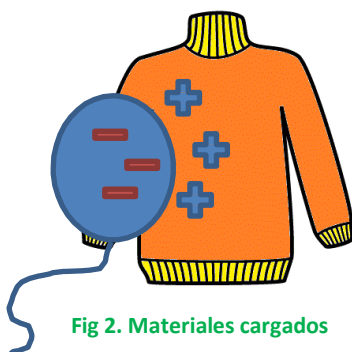


Fig 2. Materiales cargados

Cargar un cuerpo puede ser tan sencillo como frotarlo con otro material. Así sucede, por ejemplo, cuando frotamos un globo de plástico con un jersey de lana. La lana pierde electrones, que saltan al globo y lo cargan negativamente, dejando el jersey con carga positiva (Fig. 2).

Algunas propiedades en relación con la carga eléctrica son las siguientes:

- Cargas opuestas se atraen y cargas iguales se repelen.
- Un dipolo eléctrico está formado por dos cargas idénticas y de distinto signo, separadas una distancia determinada.
- Un material en el que los electrones pueden desplazarse libremente se denomina conductor y un material en el que los electrones están fuertemente ligados y no pueden desplazarse fácilmente es un aislante o dieléctrico.
- Si el cuerpo es un conductor, las cargas se distribuyen sobre su superficie.
- La carga se transmite entre dos cuerpos en contacto. Si dos cuerpos tienen distinta carga y los ponemos en contacto, las cargas se distribuyen entre los dos hasta igualarse.
- Se puede inducir una redistribución de cargas en un cuerpo simplemente por proximidad con un objeto cargado, como puede observarse en la figura 3:



Fig 3. Redistribución de cargas

FUERZA ELECTROSTÁTICA

La fuerza electrostática F es la fuerza ejercida entre dos cargas que no están en movimiento. Es una magnitud vectorial que se mide en Newtons (N), por lo que siempre debemos definir su dirección y el sentido en el que actúa. Las cargas opuestas sufren una fuerza atractiva y en las cargas iguales la fuerza es repulsiva.

La Ley de Coulomb es la que determina la intensidad de esta fuerza. En su expresión podemos observar que la fuerza es directamente proporcional al producto de las cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. Cuanto mayores sean las cargas, más intensa será la fuerza. Cuanto mayor sea la distancia, menor será el valor de la fuerza (Fig. 4).

Ley de Coulomb

Donde q_1 y q_2 son dos cargas,
 d es la distancia entre ellas y
 $k=9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ (vacío).

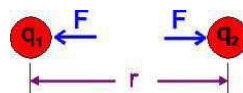


Fig 4. Ley de Coulomb

CAMPO ELÉCTRICO

Un campo eléctrico E se define como un campo de fuerza creado por la atracción y repulsión de cargas eléctricas en un lugar del espacio, el cual decrece con el cuadrado de la distancia a la carga fuente. Los campos eléctricos estáticos (campos electrostáticos) son campos eléctricos que no varían con el tiempo.

Las unidades en las que se mide dicho campo son voltios por metro (V/m) o newtons por culombio (N/C). Se representa mediante líneas de campo eléctrico que comienzan en las cargas positivas y terminan en las cargas negativas, y que están más comprimidas cuando el campo es más intenso.

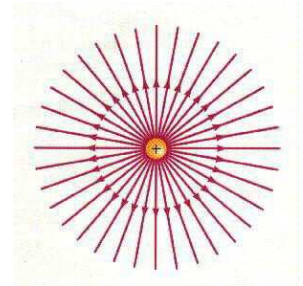


Fig 5. Campo eléctrico creado por una carga positiva

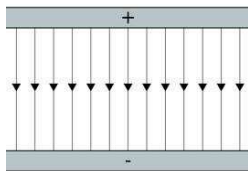


Fig 6. Campo eléctrico creado por dos placas paralelas

Por ejemplo, una carga puntual (Fig. 5) genera un campo radial a su alrededor. Si tenemos dos placas paralelas cargadas con distinto signo, el campo será perpendicular a las placas, y con sentido de la placa positiva a la negativa (Fig. 6).

La expresión del campo eléctrico es similar a la de la fuerza eléctrica, salvo por el hecho de que sólo interviene una carga: la que genera el campo.

Si queremos averiguar qué fuerza F sufre una carga q inmersa en un campo eléctrico E existente, no tenemos más que multiplicar el campo E por la carga q :

$$F = E \cdot q$$

Campo eléctrico

Donde q es la carga, d es la distancia desde la carga al lugar donde se mide E , y $k=9 \cdot 10^9$ Nm^2/C^2 (vacío).

Un dipolo situado en un campo eléctrico tenderá a orientarse en la dirección de éste, con su carga negativa hacia el origen del campo (Fig. 7).

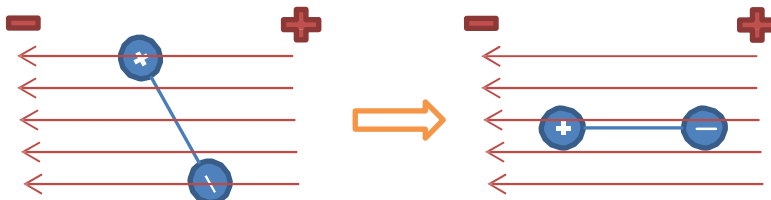


Fig 7. Dipolo orientándose en un campo eléctrico

POTENCIAL ELÉCTRICO

El potencial eléctrico V es el trabajo que debe realizar una fuerza para llevar una carga desde un punto de referencia (que situamos en el infinito, donde el potencial debe ser nulo) a otro dado. Se trata de una magnitud escalar que se mide en voltios ($V=J/C$).

Se representa mediante líneas o superficies equipotenciales que unen puntos con el mismo potencial. Estas líneas vienen determinadas también por la geometría de los objetos que generan el campo eléctrico, y son perpendiculares en todos los puntos a las líneas del campo (Fig. 8).

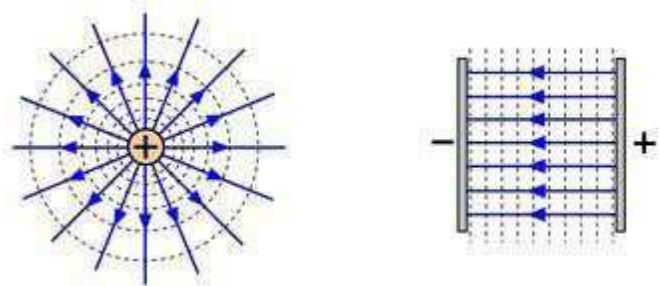


Fig 8. Líneas/superficies equipotenciales en trazos discontinuos. Líneas del campo eléctrico en trazo continuo.

Como podemos observar en la expresión del potencial eléctrico, éste depende de forma lineal de la distancia a la fuente (no cuadrática, como sucedía con la fuerza y el campo eléctrico). El potencial debido al conjunto de varias cargas será la suma de los potenciales individuales.

Para relacionarlo con el campo eléctrico basta con multiplicar éste último por la distancia a la que nos encontramos de la fuente, de forma que:

$$V = E \cdot r$$

Si finalmente queremos obtener la energía potencial eléctrica, debemos multiplicar el potencial por la carga que queremos trasladar a ese punto:

$$E_p = q \cdot V$$

Esta energía es escalar y se mide en julios (J) en el sistema internacional. Observemos que el potencial eléctrico coincide con la energía potencial para una carga de 1 C.

Potencial eléctrico

—

Donde q es la carga, d es la distancia desde la carga al lugar donde se calcula V , y $k=9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ (vacío).

CAMPO MAGNÉTICO

Un campo magnético B es un campo de fuerza creado como consecuencia del movimiento de cargas eléctricas (flujo electrostático) o por polos magnéticos. Concretamente, se define como la región del espacio en que una carga con velocidad v sufre los efectos de una fuerza perpendicular y proporcional a v y a B .

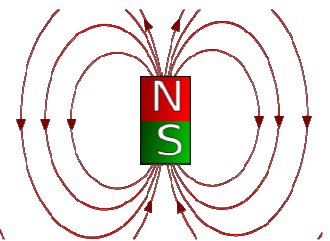


Fig 9. Líneas del campo magnético

Es una magnitud vectorial, también llamada inducción magnética, que se mide en teslas (T) o gauss (G), siendo $10.000 \text{ G} = 1 \text{ T}$.

Se representa mediante líneas de campo magnético (Fig. 9), totalmente cerradas, que unen los polos opuestos saliendo del norte y volviendo a entrar por el sur, circulando por dentro del dipolo magnético. Como los polos magnéticos aislados no existen, no hay puntos en el espacio donde las líneas de campo magnético comiencen o terminen.

Campo creado por un conductor rectilíneo

—

Donde I es la intensidad de la corriente, r es la distancia al conductor y $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ N/A}^2$.

Como ejemplo, veamos la expresión del campo magnético creado por un conductor rectilíneo por el que circula una corriente I . En esta expresión se observa que, al igual que sucedía con el campo eléctrico, el campo magnético disminuye cuando aumenta la distancia a la fuente. Además, depende del valor de la corriente que circula, de forma que si aumentamos la corriente, el campo magnético será mayor.

FUERZA MAGNÉTICA

La fuerza magnética es la que sufre una carga en movimiento inmersa en un campo magnético. Es una magnitud vectorial que se mide en newtons (N), perpendicular tanto al campo magnético B como a la velocidad v que lleva la partícula (Fig. 10). Su magnitud depende del ángulo entre v y B , siendo máxima cuando v y B son perpendiculares, y su sentido viene dado por la regla de la mano derecha o del sacacorchos.

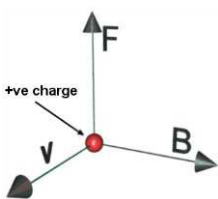


Fig 10. Orientación de la fuerza magnética B en relación con el campo B y la velocidad de la carga, v .

Fuerza magnética

Donde q es la carga, v es la velocidad con que se desplaza y B es el campo magnético que la rodea. Los símbolos \cdot y \times significan producto escalar y vectorial, respectivamente.

Imaginemos un conductor rectilíneo por el que circula una corriente (Fig. 11). Si colocamos la mano como en la figura, con el pulgar apuntando en la dirección y sentido de la corriente eléctrica, el movimiento natural de cierre de los demás dedos nos da el sentido del campo magnético que se genera (en este caso, sentido antihorario, contrario a las agujas del reloj). La regla del sacacorchos se aplica imaginando el movimiento que tendría que hacer un sacacorchos para sacar (corriente hacia arriba) o introducir (corriente hacia abajo) un corcho en una botella.

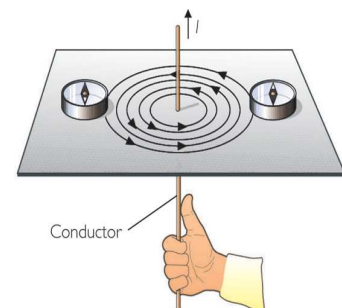


Fig 11. Campo magnético generado por una corriente eléctrica rectilínea.

INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Hemos visto cómo una corriente que circula por un conductor crea un campo magnético. La inducción magnética refleja el proceso inverso: un campo magnético variable puede inducir una corriente en un conductor.

La Ley de Faraday nos dice que el voltaje inducido en un circuito es proporcional a la variación del flujo magnético, es decir, a los cambios en el campo magnético que lo atraviesa. Si no hay variación del campo magnético, no hay inducción de corriente, por lo que un campo magnético estático no sirve para este fin.

Además, la Ley de Lenz indica que el sentido de la corriente inducida es tal que se opone a la causa que la produce.

Por este motivo, cuando dejamos caer un imán esférico a través de un tubo conductor, la caída del imán se ve frenada. El campo B del imán, al moverse con cierta velocidad, cambia con el tiempo respecto al tubo, lo que induce una corriente circular I en la sección del mismo. Por la ley de Lenz esta corriente tiene un sentido que se opone a la causa, que en este caso es la velocidad de caída, por lo que esta velocidad debe disminuir (Fig. 12).

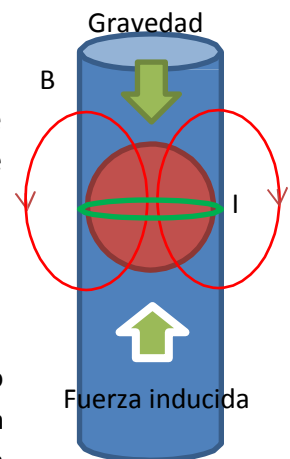


Fig 12. Inducción magnética producida por el movimiento de caída de un imán esférico por un tubo conductor.

ONDAS

Una onda es una perturbación que se transmite en un medio. La perturbación puede ser de distintos tipos: de presión, de densidad, de campo eléctrico, etc. Para caracterizar una onda necesitamos determinar cuatro elementos (Fig. 13):

- Amplitud de la onda (A): es la distancia vertical desde la cresta de la onda hasta el eje horizontal.
- Longitud de onda (λ): es la distancia horizontal entre dos crestas sucesivas. Al ser una longitud se mide en metros (m).
- Periodo (T): es el tiempo empleado en completar una oscilación. Se mide en segundos (s)
- Frecuencia (f): es el número de oscilaciones completadas en la unidad de tiempo. Se mide en hercios ($\text{Hz}=1/\text{s}$). En una red eléctrica funcionando a 50 Hz la corriente cambia de sentido 50 veces por segundo.

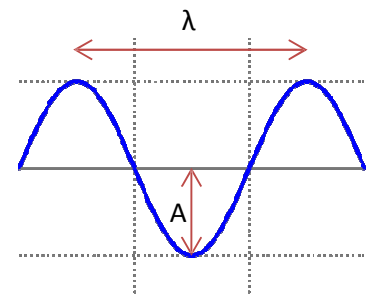


Fig 13. Esquema de onda.

Podemos relacionar el periodo con la frecuencia, ya que una magnitud es la inversa de la otra ($T = 1/f$). También podemos calcular la frecuencia a partir de la longitud de onda: el producto de ambas es la velocidad de propagación ($\lambda \cdot f = v$).

Cuando se trata de una onda electromagnética desplazándose en el vacío se utiliza la velocidad de la luz ($c=3\cdot 10^8$ m/s), por lo que tenemos finalmente una expresión que permite calcular la longitud de onda a partir de la frecuencia y viceversa.

Relación longitud de onda-frecuencia en el vacío

Donde λ es la longitud de onda, f es la frecuencia y $c = 3\cdot 10^8$ m/s

Ejemplo

Queremos averiguar la longitud de una onda procedente de un antena de telefonía móvil a 1900 MHz ($f = 1,9\cdot 10^9$ Hz). Aplicando la relación entre longitud de onda y frecuencia en el vacío obtenemos:

$$\lambda = c/f = 3\cdot 10^8 / 1,9\cdot 10^9 = 0,158 \text{ m} = 15,8 \text{ cm.}$$

Por lo tanto, hay 15,8 cm entre dos crestas sucesivas de la onda.

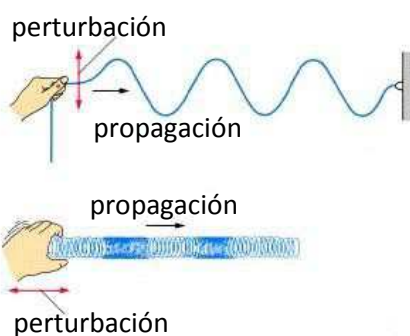


Fig 14. Ondas transversales (arriba) y longitudinales (abajo).

Además de estas características, necesitaremos conocer la dirección de la propagación (hacia dónde se transmite la perturbación) y de la propia perturbación (la dirección de la causa que produce los cambios), que pueden coincidir o no. Por este motivo podemos encontrar ondas longitudinales o transversales (Fig. 14).

Las ondas longitudinales son aquellas en las que las direcciones de la propagación y de la perturbación coinciden. Un ejemplo lo tenemos en las ondas de sonido, en las que la presión que causa el sonido se ejerce en la misma dirección en que se propaga.

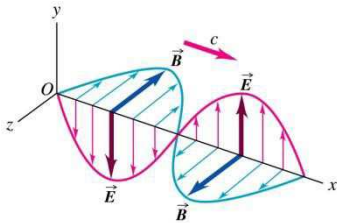
Las ondas transversales son aquellas en las que las direcciones de la propagación y de la perturbación son perpendiculares, como es el caso de las ondas electromagnéticas.

ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

El **fotón** es el cuanto o unidad mínima de energía electromagnética. La energía de un fotón está determinada por la frecuencia de la onda que transporta esa energía. Por este motivo, la energía de una radiación electromagnética es mayor a mayores frecuencias. La energía de un fotón de luz visible es aproximadamente de $4\cdot 10^{-19}$ J.

Energía de un fotón

Donde E es la energía en julios (J), f es la frecuencia en hercios (Hz) y $h = 6,62\cdot 10^{-34}$ J·s (constante de Planck)



Las ondas electromagnéticas están compuestas por un campo eléctrico y un campo magnético orientados de forma perpendicular entre sí (Fig. 15). Se denomina **radiación** a la energía transportada por dicha onda.

Como hemos visto, en el vacío una onda se propaga sin sufrir cambios a una velocidad constante $c=3\cdot 10^8$ m/s. Pero si el medio es distinto del vacío encontramos algunos fenómenos interesantes.

Fig 15. Onda electromagnética.

Atenuación

Cuando una onda electromagnética atraviesa un material distinto del vacío se verá modificada y puede sufrir atenuación o cambios en su dirección de propagación. Existe dos coeficientes que nos muestran cómo de atenuante es un medio: la permitividad eléctrica (ϵ) y la permeabilidad magnética (μ).

La **permitividad eléctrica** indica la tendencia a polarizarse de un material en presencia de un campo eléctrico. El efecto de esta polarización es la aparición de un campo eléctrico opuesto al inicial, de forma que éste se atenúa. En el vacío, el valor de la permitividad es $\epsilon_0= 8,85\cdot 10^{-12}$ F/m. Al pasar de un medio de menor permitividad a uno de mayor permitividad la velocidad de propagación disminuye.

La **permeabilidad magnética** cuantifica la capacidad que tiene un medio para hacer que un campo magnético pase a su través, desviando así las líneas del campo magnético, es decir, la magnetización de un material. La permeabilidad magnética del vacío es $\mu_0= 4\cdot 10^{-7}$ N/A². Los materiales paramagnéticos tienen una permeabilidad similar a la del vacío, mientras que para los materiales ferromagnéticos, como el hierro, este índice es muy superior. Los materiales diamagnéticos (como el cobre) tienen permeabilidad inferior a la del vacío.

Absorción

La radiación electromagnética puede ser absorbida por la materia, siendo reemitida nuevamente o transformada en otro tipo de energía (por ejemplo, calor). Los materiales absorben radiación en ciertas frecuencias, de forma que el espectro de absorción puede utilizarse para caracterizar un material según su composición química.

Si un material absorbe radiación en una determinada longitud de onda, se dice que es **opaco** a esta radiación, mientras que si la deja pasar se dirá que es **transparente**. Las nubes son muy opacas al infrarrojo, por lo que permiten que el calor emitido por la superficie terrestre no escape a las capas superiores de la atmósfera. La vegetación es opaca a gran parte de la radiación visible, lo que facilita la absorción de energía para su fotosíntesis. En cuanto a las radiofrecuencias, los mayores absorbentes son el agua y los metales, así como la vegetación muy húmeda. Los materiales plásticos suelen ser poco absorbentes en este rango de frecuencias.

Reflexión y refracción

Cuando una onda llega a la frontera de separación entre dos medios se producen dos fenómenos: reflexión y refracción.

Una **reflexión** consiste en un cambio en la dirección y sentido de propagación de una onda. La frontera entre dos medios actúa como un espejo y la radiación sale con el mismo ángulo con el que incidió (Fig. 16). Otra parte de la onda penetra en el segundo medio (**refracción**), pero cambia su trayectoria en función de las propiedades de este medio, según el índice de refracción.

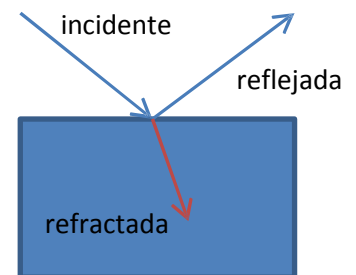


Fig 16. Reflexión y refracción

El efecto de reflexión tiene una consecuencia negativa a la hora de averiguar la fuente de una radiación: el multitrayecto. A menudo las ondas pueden recorrer caminos largos tras múltiples reflexiones sobre superficies con distinta orientación, por lo que pueden observarse sus efectos en lugares que, a priori, no deberían recibir radiación. Consecuentemente, es posible que en una vivienda se registre la radiación electromagnética procedente de una antena de telefonía móvil lejana u orientada con otra dirección debido a la reflexión de las ondas en los edificios de los alrededores.

Difracción e interferencia

El fenómeno de la **difracción** permite a las ondas realizar recorridos que podrían parecer ilógicos, como “doblar” una esquina (Fig. 17). En el proceso de la difracción se pierde cierta cantidad de energía, por lo que la radiación no llegará con la misma intensidad con la que se emitió.



Fig 17. Difracción



Denominamos **interferencia** a un fenómeno que altera una onda durante su trayecto en el medio en el que se propaga debido a la presencia de otras ondas. La interferencia de ondas puede ser un fenómeno constructivo o destructivo, provocado por la superposición de dos o más ondas electromagnéticas que suman o restan sus efectos (Fig. 18).

Fig 18. Interferencia

PROPIEDADES ELÉCTRICAS Y MAGNÉTICAS DE LOS MATERIALES

Conductividad eléctrica

Es la capacidad de un material de permitir el paso de corriente eléctrica a su través, en forma de electrones o iones. Se representa con la letra griega ρ (rho) y sus unidades son siemens/metro (S/m), o bien ohmios⁻¹ segundos⁻¹ ($\Omega^{-1}\cdot s^{-1}$). Según su conductividad podemos clasificar los materiales en aislantes o dieléctricos, conductores, semiconductores y superconductores.

En los **metales**, buenos conductores, los electrones tienen libertad para moverse por su superficie, formando una nube de electrones que facilitan el paso de corriente (Fig. 19). En el caso algunos materiales líquidos o gaseosos, los que realizan la tarea de transporte de corriente son los iones que pueden desplazarse en estos medios pero no en medios sólidos. Los materiales dieléctricos dificultan el paso de corriente eléctrica porque no poseen una cantidad de electrones libres que puedan desplazarse.

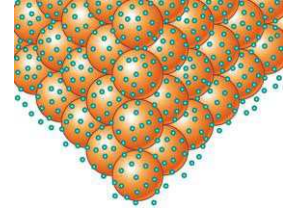


Fig 19. Electrones en metal

En los **semiconductores** los electrones que inicialmente están más ligados a los núcleos pueden excitarse y saltar a la denominada banda de conducción, ganando movilidad y dejando tras de sí huecos que quedan cargados positivamente. Aquí la conducción se realiza por medio de electrones libres y huecos. Los superconductores son materiales que tienen una conductividad perfecta a muy bajas temperaturas y en presencia de campos magnéticos.

La **temperatura** es un factor importante a tener en cuenta, ya que afecta al comportamiento de conductores y semiconductores. En un conductor, una temperatura elevada aumenta los choques entre electrones por agitación térmica, lo que ralentiza su movimiento haciendo que la conductividad disminuya. En el caso de los semiconductores, un aumento de temperatura eleva la conductividad ya que aumenta la cantidad de portadores de carga, que en este caso son los electrones (carga negativa) y los huecos que dejan detrás al excitarse (carga positiva).

Permeabilidad magnética

Como ya se ha mencionado, la **permeabilidad magnética** es una propiedad que permite que el campo magnético se deforme y circule por el interior de un material. Cuando tenemos un medio de elevada permeabilidad magnética las líneas del campo magnético se curvan para circular a través de él y de esta forma podemos evitar que atraviesen otras zonas, como se puede ver en la figura 20.

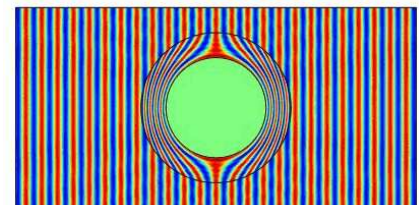


Fig 20. Permeabilidad magnética

En este principio se basan los elementos de protección frente a campos magnéticos de baja frecuencia, empleando materiales como el mumetal, costoso pero de muy elevada permeabilidad (20.000 veces la del vacío). Se utiliza para aislamiento de cables, dispositivos electrónicos, etc.

INTERACCIONES CON LA MATERIA

Cargas estáticas

Recordemos que los electrones pueden saltar de unos materiales a otros y, como consecuencia, los que han perdido electrones quedan cargados positivamente y los que los han ganado quedan cargados negativamente. Las cargas negativas de los electrones pueden acumularse en la superficie de los materiales y, en un momento dado, producir una descarga que puede adoptar la forma de pequeñas chispas, arcos o incluso relámpagos cuando hablamos de la atmósfera de un planeta.

En primer lugar se produce la generación de cargas electrostáticas por frotamiento o por inducción. Posteriormente se registra una acumulación de las mismas en los materiales no conductores y en la superficie de los conductores aislados. A mayor acumulación de cargas electrostáticas corresponde una mayor diferencia de potencial.

La disipación de las cargas electrostáticas se produce mediante transferencia de carga entre el cuerpo cargado y un sumidero que denominamos *tierra*. Cuando la acumulación de cargas es grande y no existe disipación, se llega a una situación en que es inevitable la descarga electrostática. El fenómeno ocurre especialmente cuando el cuerpo cargado se acerca a un elemento con un cierto grado de conductividad a tierra. En ese momento la intensidad del campo eléctrico existente sobrepasa la rigidez dieléctrica del aire y se genera una chispa visible y audible en muchos casos (Fig. 21).

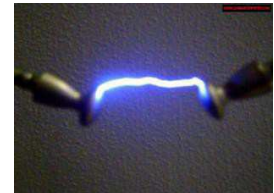


Fig 21. Descarga eléctrica

El agua es buen conductor, por lo que un ambiente húmedo permitirá una mejor circulación de electrones que uno seco. Cuando estamos en ambiente seco las cargas se acumulan pero no pueden saltar de la superficie del material a menos que superen la rigidez del dieléctrico, que para el aire seco es de 3 MV/m. Las partes agudas de los objetos pueden ayudar a que el límite no sea tan elevado y que se alcance con campos eléctricos inferiores a esa cantidad.

Jaula de Faraday

La Jaula de Faraday (también llamada Campana de Faraday) consiste en un conductor que rodea por completo un espacio y que se descarga mediante una toma de tierra. El espacio encerrado por el conductor queda absolutamente libre de campo eléctrico. Esto se debe a que, cuando el conductor está sujeto a un campo eléctrico externo, se polariza de manera que queda cargado negativamente en la superficie orientada hacia la fuente de ese campo, y cargado positivamente en la parte contraria (Fig. 22).

Puesto que el conductor se ha polarizado, se genera un campo eléctrico igual en magnitud pero opuesto en sentido al campo eléctrico inicial, luego la suma de ambos campos dentro del conductor será igual a 0 ya que uno compensa el otro.

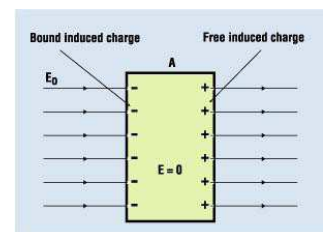


Fig 22. Polarización.

Es un método apropiado para protegerse frente a las descargas eléctricas y frente a la parte eléctrica de los campos de baja y alta frecuencia. Se puede comprobar fácilmente utilizando, por ejemplo, papel de aluminio para envolver una radio: las ondas de radio no llegan al receptor y no captaremos ninguna señal.

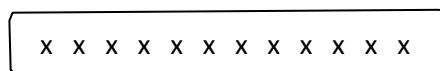
Para construir una jaula de Faraday podemos utilizar láminas o mallas metálicas. La condición para que funcione es que el tamaño del mallado sea inferior a la longitud de las ondas incidentes. La eficacia del apantallado dependerá del metal utilizado y de la longitud de onda de la radiación. Este dispositivo no impide la presencia de los campos magnéticos estáticos y de baja frecuencia, por lo que no sirve para atenuar el campo magnético generado por la red eléctrica o el campo geomagnético.

Corrientes de Foucault

Para entender este efecto recordemos las leyes de Faraday y Lenz, que nos indicaban que un campo magnético variable generará una corriente cuyos efectos se opondrán al campo de partida. Si la causa del flujo de campo magnético es una corriente eléctrica, la nueva corriente originada se opondrá a la anterior. Cuando la causa que provoca la variación en el campo magnético es el movimiento, éste tenderá a detenerse, como vimos en el experimento de la esfera imantada cayendo por un tubo de cobre.

Si la corriente atraviesa un conductor, el resultado de la variación del campo magnético es la aparición de las corrientes de Foucault (o Eddy Currents en el mundo anglosajón). Estas corrientes no suelen ser un efecto deseado, ya que producen disipación de energía en forma de calor. En los hornos de inducción se aprovechan estas corrientes y se genera calor para fundir metales.

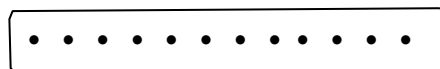
Vamos cómo funciona este fenómeno. Supongamos una chapa de cierto espesor sometida a un campo magnético variable de frecuencia f :



El campo magnético es perpendicular al plano del papel y las "x" indican que el campo entra hacia el papel. De acuerdo con las leyes mencionadas, la corriente que este campo genera en el conductor tiene este aspecto aproximado:



Unas corrientes así provocarán la aparición de un campo magnético también perpendicular a la chapa, pero esta vez hacia fuera del papel:



Cuando provocamos corrientes en materiales ferromagnéticos que no son aislantes, lo que tenemos son pérdidas magnéticas cuya magnitud depende de factores como el espesor del material o la frecuencia del campo. Una menor conductividad del material ferromagnético producirá menores pérdidas magnéticas. Un material más denso o de mayor espesor producirá pérdidas mayores. Y finalmente, a mayores frecuencias incidentes, mayores son las pérdidas por corrientes de Foucault.

2. RADIACIONES NO IONIZANTES

ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

El **espectro electromagnético** representa la distribución de las distintas ondas electromagnéticas según su frecuencia o longitud de onda, como puede observarse en la figura 23.

La energía, como ya hemos visto, es mayor para frecuencias más altas. Pero, por otro lado, la penetrabilidad disminuye para frecuencias elevadas, debido a que la longitud de onda es más pequeña. Se podría decir que para superar un obstáculo la longitud de onda debe ser mayor que el tamaño del obstáculo en cuestión.

También podemos ver que las radiaciones se dividen en dos tipos según la frecuencia: radiaciones no ionizantes, de frecuencias entre 0 y 10^{15} Hz aproximadamente y radiaciones ionizantes por encima de esta cantidad. Debido a su mayor energía, la radiación ionizante es capaz de ionizar la materia, arrancando electrones y rompiendo moléculas. Por el contrario, la radiación no ionizante no tiene energía suficiente para ionizar, aunque sí para excitar los electrones.

Las **radiaciones ionizantes** se clasifican en dos tipos según su origen: electromagnéticas o corpusculares.

Electromagnética, originada por fotones:

- UV lejano y extremo (10-200 nm)
- Rayos X (0,1–10 nm)
- Rayos gamma (<0,1 nm)

Y corpuscular, debida a partículas:

- α (núcleo de He)
- β (electrones o positrones procedentes de desintegraciones radiactivas)
- Protones, neutrones y otras partículas

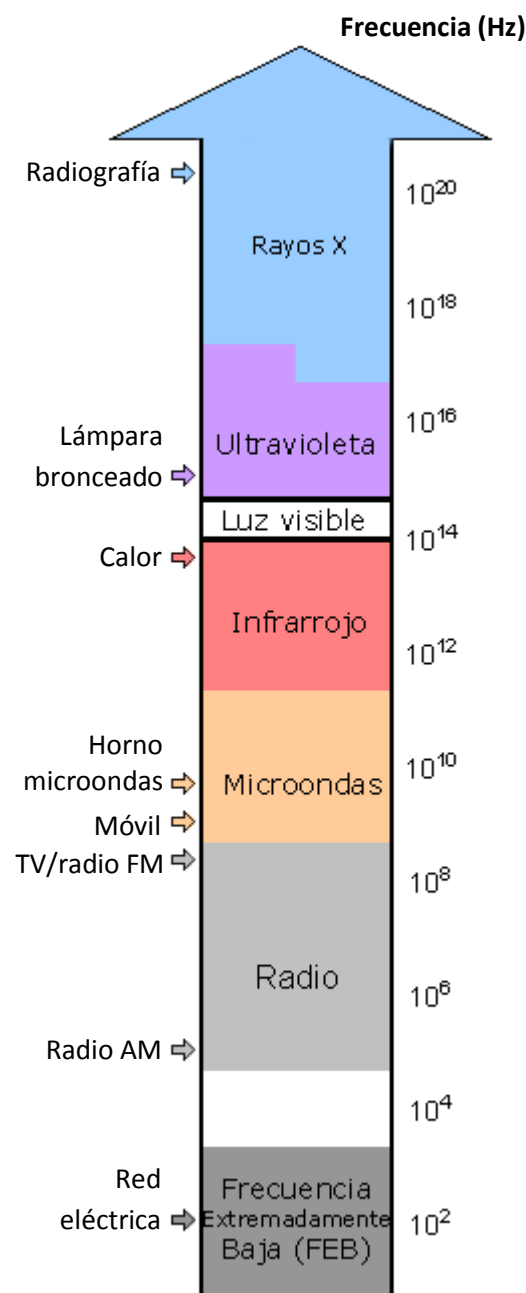


Fig. 23: Espectro electromagnético.

RADIACIONES NO IONIZANTES

Las **radiaciones no ionizantes** tienen carácter puramente electromagnético, y podemos dividir las de forma aproximada según su longitud de onda:

Tipo de radiación	Longitud de onda	Frecuencia
Ultravioleta UVA, UVB, UVC	200 nm -400 nm	750 THz- 1500 THz
Luz visible	400 nm -760 nm	395 THz-750 THz
Infrarrojo	760 nm-1 mm	300 GHz – 395 THz
Microondas	1mm – 1 m	300 MHz-300 GHz
Radiofrecuencias	1 m – 1000 km	300 Hz – 300 MHz
Frecuencias extremadamente bajas	1000-100000 km	3 Hz – 300 Hz

A menudo se incluyen en las radiofrecuencias tanto las microondas como las frecuencias bajas, por lo que esta división no es del todo estricta. Por otro lado, se denominan radiaciones ópticas a las comprendidas entre 100 nm y 1 mm (ultravioleta, visible e infrarrojo). A continuación haremos un repaso por todos los tipos de radiación no ionizante, sus características, sus fuentes y algunos posibles efectos.

ULTRAVIOLETA NO IONIZANTE

La radiación ultravioleta marca la frontera entre las radiaciones ionizantes y no ionizantes. Los tipos de ultravioleta que consideraremos son:

- UVA 320-400 nm; energía: 3,5 eV/fotón
- UVB 280-320 nm; energía: 4 eV/fotón
- UVC 200-280 nm ; energía: 5 eV/fotón



Fig. 24: Lámpara de bronceado.

El ultravioleta A (UVA) es el de menor energía y menor frecuencia (mayor longitud de onda), mientras que los ultravioletas B y C tienen una mayor cantidad de energía. La fuente natural principal de este tipo de radiación es el sol, cuyo espectro incluye además otras frecuencias (infrarrojos, ondas de radio, etc.).

En cuanto a las fuentes artificiales, podemos encontrar lámparas de luz negra (UV), lámparas germicidas utilizadas como desinfectantes (UVC), lámparas de bronceado (UVA, UVB) (Fig. 24), tratamientos dermatológicos (UVA), lámparas fluorescentes y halógenas.

La radiación ultravioleta es altamente mutagénica, siendo capaz de producir daños serios en el ADN. Encontramos efectos directos en piel y ojos tras la exposición a esta radiación.

Afortunadamente, la parte de la radiación ultravioleta más energética, UVB y UVC, es absorbida en un elevado porcentaje por la atmósfera, de forma que sólo una pequeña fracción de UVB alcanza la superficie terrestre. Sin embargo, esta cantidad es suficiente para provocar daños en la piel, aunque tiene efectos beneficiosos en pequeñas dosis como producción de vitamina D. La radiación UVA también puede provocar quemaduras, envejecimiento prematuro y cáncer de piel a largo plazo. En cuanto a la vista, los efectos nocivos más habituales son fotoqueratitis, problemas en la córnea y cataratas.

LUZ VISIBLE

La longitud de onda de la parte visible del espectro electromagnético va desde los 400 a los 700 nm, correspondiendo la menor longitud de onda al violeta y la mayor, al rojo (Fig. 25).

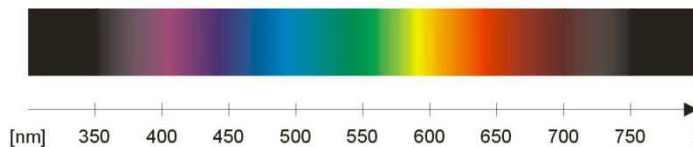


Fig. 25: Espectro luz

visible.

La fuente principal de luz visible en nuestro planeta es el Sol, así como la luz proveniente de otros cuerpos celestes. Como fuentes artificiales contamos con el alumbrado: lámparas clásicas de incandescencia, tubos fluorescentes y otras formas de iluminación que utilizamos en nuestra vida diaria.

La luz visible cuenta con evidentes aspectos positivos. Resulta indispensable para la fotosíntesis en los vegetales y para la mayor parte de la vida animal. Incluso se conoce la influencia que un lugar correctamente iluminado tiene sobre las personas que lo habitan desde un punto de vista psicológico. De hecho, los cambios de la cantidad de luz visible entre la noche y el día tienen una acción fundamental sobre los ritmos circadianos relacionados con los estados de sueño y vigilia.

Pero su exceso también puede tener efectos negativos, por ejemplo en los ojos: degeneración macular o cataratas son algunas enfermedades oculares provocadas por exceso de luz. En el sistema nervioso, un exceso de luz visible modifica la generación/liberación de neurotransmisores.

RADIACIÓN INFRARROJA

La radiación infrarroja se divide en tres rangos entre los 780 nm y los 100.000 nm:

- IR cercano: 780 nm - 1100 nm.
- IR medio: 1100 -15000 nm.
- IR lejano: 15-100 μ m.

Las fuentes naturales fundamentales son los cuerpos celestes, pero también la superficie terrestre y los seres vivos que la habitan. Ello es debido a que se trata de una radiación directamente relacionada con la emisión de calor. En cuanto a las fuentes artificiales, encontramos lámparas de IR para tratamientos médicos, mandos a distancia, emisores de calor o LASER de infrarrojos, entre otros.

Por supuesto, también se conocen efectos negativos en piel y ojos, muchos de ellos relacionados con la elevación de la temperatura: quemaduras, daños en retina, córnea y cristalino, etc.

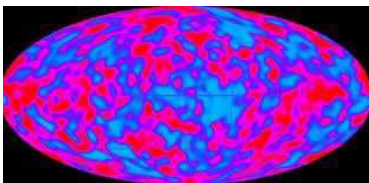
RADIOFRECUENCIAS

Las radiofrecuencias engloban desde las microondas hasta las ondas de muy baja frecuencia: 1 mm – Km. (3 Hz-300 GHz.). Las características son muy diferentes, debido al aporte energético y la penetrabilidad tan variables. Según la frecuencia:

- $f > 10$ GHz: la radiación se absorbe en la piel. Si es muy intensa puede provocar quemaduras en la piel y cataratas.
- $f = 1$ MHz – 10 GHz: produce calentamiento de tejidos, infertilidad y problemas en el desarrollo fetal.
- $f < 1$ MHz: genera contracciones involuntarias en músculos y alteración neuronal, posible desarrollo de cáncer y otras enfermedades.

MICROONDAS

La radiación de microondas comprende longitudes de onda de 1 mm a 1 m. (300 MHz-300 GHz.). Se trata de una radiación muy energética, pero poco penetrante por otra parte. En los 2,45 GHz se encuentra la frecuencia de resonancia de la molécula de agua, motivo por el que esta radiación se emplea para elevar la temperatura en hornos de microondas.



Entre las fuentes naturales están, una vez más, los cuerpos celestes. Especial importancia tiene la radiación cósmica de fondo, con una frecuencia de 160,2 GHz (longitud de onda: 1,9 mm), descubierta en 1965 e interpretada como un residuo electromagnético del Big Bang (Fig. 26).

Fig. 26: Fondo cósmico de microondas

Las fuentes artificiales que podemos encontrar fácilmente a nuestro alrededor son hornos de microondas, telecomunicaciones de móviles, radares o dispositivos MASER (similar al LASER, empleando microondas).

Como ya se ha mencionado, el efecto ampliamente reconocido es el efecto térmico, con una elevación de la temperatura en función de la potencia de la radiación, si bien existen otros efectos menos evidentes, pero no por ello menos importantes. Sirva como ejemplo el debate actual sobre los efectos nocivos de las antenas y dispositivos de telecomunicaciones.

FRECUENCIAS INTERMEDIAS

Entre ellas encontramos las denominadas MF (Medium Frequency), HF (High Frequency) y VHF (Very High Frequency), que van desde los 300 kHz hasta los 300 MHz.

Las encontramos fundamentalmente en radiodifusión y emisoras de radioaficionado, ya que rebotan en la ionosfera y esto permite alcanzar grandes distancias sobre la superficie terrestre. También se emplean en comunicaciones militares, aeronáuticas, algunos teléfonos inalámbricos y otros dispositivos.

BAJAS FRECUENCIAS

Las denominadas comúnmente como bajas frecuencias comprenden desde las frecuencias extremadamente bajas (ELF) hasta las bajas frecuencias propiamente dichas (LF), con longitudes de onda entre 10.000 y 100.000 Km. (3 Hz - 300 kHz). Destacan las ELF por incluirse entre ellas la frecuencia a la que funciona la red eléctrica (50/60 Hz) (Fig. 27).



Fig. 27. Transporte eléctrico

Una fuente natural de especial importancia es el resonador ionosfera-superficie terrestre, que oscila a 7,8 Hz y otros armónicos algo superiores. Asimismo podemos encontrar fuentes biológicas, como las ondas cerebrales alfa, beta, delta y theta, que van desde los 3 Hz hasta los 40 Hz aproximadamente.

Las fuentes artificiales son muy numerosas en nuestro entorno: electrodomésticos y redes eléctricas (50 Hz/60 Hz), algunas antenas y comunicaciones de muy largo alcance.

CAMPOS ESTÁTICOS

Los campos estáticos, al contrario que las radiaciones que hemos visto hasta ahora, no presentan variación periódica en el tiempo. Por lo tanto, su frecuencia se considera nula.



Fig. 28: Campo geomagnético.

La fuente natural de campo magnético más importante es, sin duda, el campo geomagnético, un campo similar al que generaría un gran imán situado en el centro de la Tierra, aunque con algunas salvedades (Fig. 28). No se trata de un campo absolutamente estático ya que cuenta con variaciones diurnas, estacionales y a más largo plazo, y se ve claramente influenciado por la actividad solar. Este campo se puede cuantificar entre 30.000 y 60.000 nT, según la latitud, alcanzando los valores máximos en las regiones polares. Además, existen ciertas zonas en las que hay grandes anomalías geomagnéticas, como la del Atlántico Sur o la de Siberia oriental.

La Tierra también presenta un campo eléctrico de unos 10 V/m que podemos medir en la superficie y que es generado por las cargas estáticas que se acumulan sobre ésta.

Otras fuentes de campos estáticos naturales son algunos minerales presentes en la corteza terrestre e incluso nanocristales de magnetita que se encuentran en el interior de organismos vivos (Fig. 29).

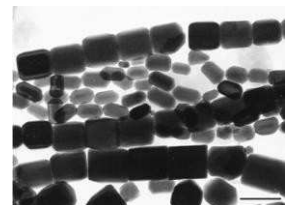


Fig. 29: Nanocristales de magnetita

Como fuentes artificiales podemos citar las cargas estáticas presentes en el mobiliario, algunos procesos de imagen médica, medios de transporte (trenes y tranvías), procesos industriales, etc.

Los efectos más usuales debidos a campos estáticos son descargas eléctricas e ionización del aire, en el caso de campo eléctrico, y alteraciones del sistema nervioso central y sistema cardiovascular, o sensación de vértigo y náuseas en campos magnéticos de distinta intensidad.

En resumen...

- Campo eléctrico y campo magnético son dos manifestaciones del efecto de cargas estáticas o en movimiento en el espacio.
- Ambos son cuantificables y disminuyen al incrementar la distancia a la fuente.
- La radiación electromagnética es la energía que transporta una onda electromagnética.
- Las radiaciones no ionizantes son aquéllas que no poseen energía suficiente para arrancar electrones o romper moléculas.
- La red eléctrica y los electrodomésticos emiten campos eléctricos y magnéticos a 50/60 Hz (bajas frecuencias).
- Las telecomunicaciones: telefonía, wifi, radares,... emplean campos electromagnéticos de alta frecuencia del orden de MHz y GHz.

Recursos adicionales

Para aprender más sobre electromagnetismo y radiaciones no ionizantes podéis visitar estos enlaces:

- Infografía del Consejo de Seguridad Nuclear sobre radiaciones:
http://www.csn.es/index.php?option=com_content&view=article&id=12244%3AAlas-radiaciones&catid=46%3AInfografias&Itemid=62&lang=es
- Recopilación actualizada de publicaciones científicas sobre efectos de radiaciones no ionizantes:
<http://www.powerwatch.org.uk/>
- Web de la Organización Mundial de la Salud referente a campos electromagnéticos:
<http://www.who.int/peh-emf/es/index.html>
- Web de la Fundación para la Salud Geoambiental: www.saludgeoambiental.org

Bibliografía

- Paul A. Tipler y Gene Mosca. *Física para la ciencia y la tecnología*. Ed. Reverté, 2005.
- William D. Callister. *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Ed. Reverté, 1995.
- ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Physics* 74(4): 494-522, 1998.
- ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic field (1 Hz – 100 kHz). *Health Physics* 99(6): 818-836, 2010.
- Bioinitiative Report: *A rationale for biologically-based exposure standards for low-intensity electromagnetic radiation*. 2012. <www.bioinitiative.org>