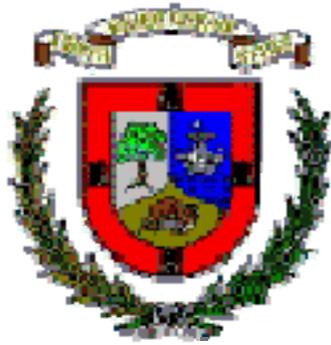


CONCEPTOS BÁSICOS DE CAMPOS
ELECTROMAGNÉTICOS DE

BAJA
FRECUENCIA



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
Grupo de Electromagnetismo

AUTORES:
Miguel Ángel Solano Vérez
Juan Sáiz Ipiña

INDICE

EL CAMPO ELECTROMAGNÉTICO DE BAJA FRECUENCIA	3
Introducción.....	3
¿Qué son los campos eléctrico y magnético?.....	3
Ejemplo de creación de campo eléctrico.....	4
Ejemplo de creación de campo magnético	5
Diferencias entre fuentes de ELF y fuentes de corriente continua	13
¿Qué pasa cuándo nos exponemos a un campo EMF-BF?.....	13
El campo eléctrico.....	14
El campo magnético.....	14
¿Produce la Tierra campo electromagnético ELF?	14



EL CAMPO ELECTROMAGNÉTICO DE BAJA FRECUENCIA

Introducción

En esta sección del curso, y una vez que se ha descrito de forma global el campo electromagnético desde el punto de vista del "bioelectromagnetismo", hemos creído conveniente, desdoblarse los conceptos genéricos de campo electromagnético de la radiación no ionizante en dos grandes grupos: campos de baja frecuencia y campos de alta frecuencia. En este bloque se describen los primeros y los segundos se dejan para el siguiente.

Desde la mitad del siglo XIX, la *electricidad* ha sido una parte esencial de nuestras vidas. La electricidad alimenta la mayoría de los equipos que los ciudadanos utilizan habitualmente haciéndoles la vida más sencilla e interesante y, en muchos aspectos, más segura. Cuando hablamos de *electricidad* nos estamos refiriendo a lo que llamaremos campo electromagnético de baja o muy baja frecuencia o, en términos menos precisos, electricidad de potencia. La mayoría de esta *electricidad* se produce a frecuencias de 50 Hercios o Ciclos por segundo (1 ciclo es una repetición de "algo" cada segundo) y a estos campos es a los que nos vamos a referir en esta lección. En el espectro electromagnético se denotan por ELF. El objetivo de estas notas es adquirir unas nociones básicas sencillas sobre el campo de baja frecuencia, compararlo con otras formas de energía electromagnética y discutir brevemente cómo afectan estos campos al entorno. Es posible que algunos términos empleados aquí puedan no ser entendidos en toda su extensión; no es algo que deba preocupar excesivamente, pues de lo que se trata aquí es de adquirir ideas globales de conceptos cuya dificultad última escapa muchos casos a estos apuntes genéricos. En esta lección, los campos eléctrico y magnético los denotaremos por CEM y si se refieren al caso de baja frecuencia por ELF (Extremely Low Frequency). Preferimos utilizar los términos en inglés porque es lo más usual de encontrar en la literatura incluso en castellano.

¿Qué son los campos eléctrico y magnético?

No es fácil encontrar una definición de campo eléctrico y magnético que a la vez sea lo suficientemente correcta para que los "puristas" no se enfaden por su falta de precisión, y que a la vez sea comprensible para los no expertos en esta materia¹. Los campos eléctricos y magnéticos (CEM) son líneas invisibles de fuerza que rodean cualquier dispositivo eléctrico. Las líneas de fuerza, las instalaciones eléctricas, y los equipos eléctricos producen CEM de baja frecuencia o ELF. Hay

¹ Podríamos pensar en intentar definir un concepto sencillo usual de la vida cotidiana, con la suficiente precisión para no contener errores pero con la necesaria sencillez para que cualquiera lo entienda. Intenta definir el concepto "puerta" siguiendo estas pautas.

muchas otras fuentes de campo electromagnético de baja frecuencia. Este documento está dirigido a campos ELF (esto es, CEM asociado con el la generación, transmisión, y uso de potencia eléctrica).

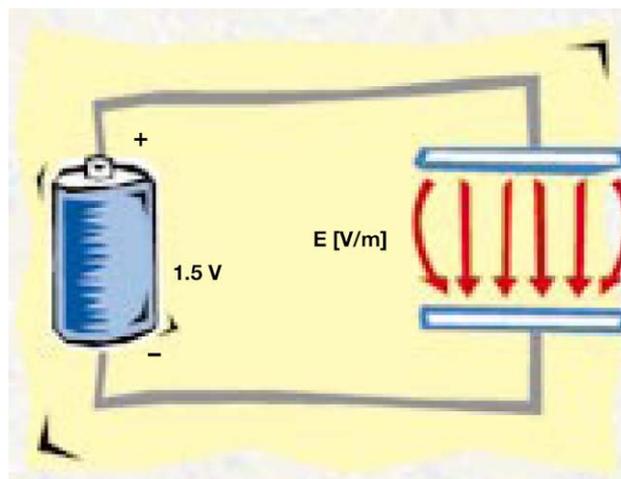
Los campos eléctricos se producen por cargas eléctricas que crean un voltaje o tensión, de manera que su magnitud crece cuando el voltaje aumenta. Se denota por la letra E . Las unidades del campo eléctrico son voltios por metro (que se denota por V/m). En la gráfica siguiente se muestra un esquema de una carga creando un campo eléctrico en todas las direcciones.



- Los campos creados por cargas estáticas disminuyen con el cuadrado de la distancia.
- Las cargas de signo iguales se repelen y de signos contrarios se atraen.
- Las cargas en movimiento crean campo eléctrico y también magnético. Sus características son, en general, diferentes al campo creado por cargas estáticas.

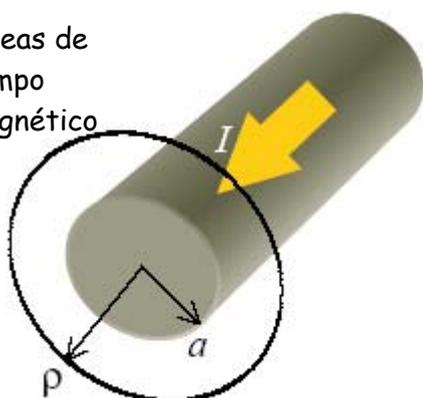
Ejemplo de creación de campo eléctrico

Supongamos que dos placas metálicas se conectan a una batería; entonces entre ellas se producirá un campo eléctrico localizado, debido a la diferencia de tensión que se establece entre dichas placas. La tensión se mide en voltios (V). Si la batería es de 1,5 V y las placas metálicas están separadas 1 metro, el campo entre ellas será de 1,5 V/m. Como vemos del dibujo el campo eléctrico (sus líneas de campo) va de las cargas positivas a las negativas, es decir, "nace" en las cargas positivas y "muere" en las negativas. En campos estáticos (aquellos que no cambian en el tiempo) la dirección del campo eléctrico es constante. El campo eléctrico estático natural de la Tierra tiene una intensidad de 0,1 a 0,5 kV/m (1k=1.000), en condiciones normales, pero que puede llegar a 20kV/m durante una tormenta. El campo se descarga a través de los relámpagos causando que una corriente fluya.



Los campos magnéticos son el resultado del flujo de corriente a través de los conductores o los dispositivos eléctricos y es directamente proporcional a esa corriente; a más corriente más campo magnético. Se denota por la letra B . Las unidades del campo magnético son Gauss (G) o Tesla (T). La unidad G es una reminiscencia de un sistema de unidades (el sistema cegesimal) bastante en desuso, pero que por historia se sigue usando en algunos ambientes. Siempre que podamos utilizaremos la unidad Tesla. En el siguiente esquema se muestra el campo magnético creado por una corriente.

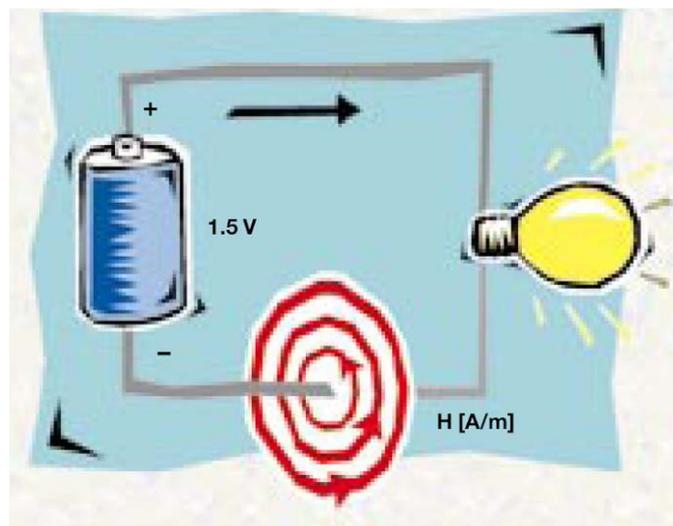
Líneas de campo magnético



- El campo magnético está creado por cargas en movimiento
- Su dependencia con la distancia depende de la configuración geométrica de la fuente (1 hilo conductor, 2 hilos etc.)
- Los imanes también crean un campo magnético

Ejemplo de creación de campo magnético

Cuando una bombilla se conecta a una batería y se enciende es que una corriente, cuyas unidades se expresan en amperios (A), circula por el circuito. Tan pronto como la corriente fluye se crea un campo magnético, además del correspondiente campo eléctrico. El campo magnético se mide en A/m. Las líneas de campo magnético son círculos concéntricos alrededor del cable por el que circula la corriente.



Los campos magnéticos estáticos están presentes en los ferrocarriles eléctricos o en las resonancias magnéticas. Asimismo, la Tierra se comporta como un gigantesco imán que crea un campo magnético de alrededor de $40 \mu\text{T}$ ($1\mu=10^{-6}$).

En este ejemplo, la tensión de la batería es de $V=1,5$ Voltios; si la corriente que circula es de $I=1$ Amperio, entonces el producto $V \times I=1,5$ Vatios es la potencia disipada en la bombilla.

En la siguiente tabla se resumen las unidades del EMF.

Measuring EMF: Common Terms	
Electric fields	
Electric field strength is measured in volts per meter (V/m) or in kilovolts per meter (kV/m). 1 kV = 1000 V	
Magnetic fields	
Magnetic fields are measured in units of gauss (G) or tesla (T). Gauss is the unit most commonly used in the United States. Tesla is the internationally accepted scientific term. 1 T = 10,000 G	
Since most environmental EMF exposures involve magnetic fields that are only a fraction of a tesla or a gauss, these are commonly measured in units of microtesla (μT) or milligauss (mG). A milligauss is 1/1,000 of a gauss. A microtesla is 1/1,000,000 of a tesla. 1 G = 1,000 mG; 1 T = 1,000,000 μT	
To convert a measurement from microtesla (μT) to milligauss (mG), multiply by 10. 1 μT = 10 mG; 0.1 μT = 1 mG	

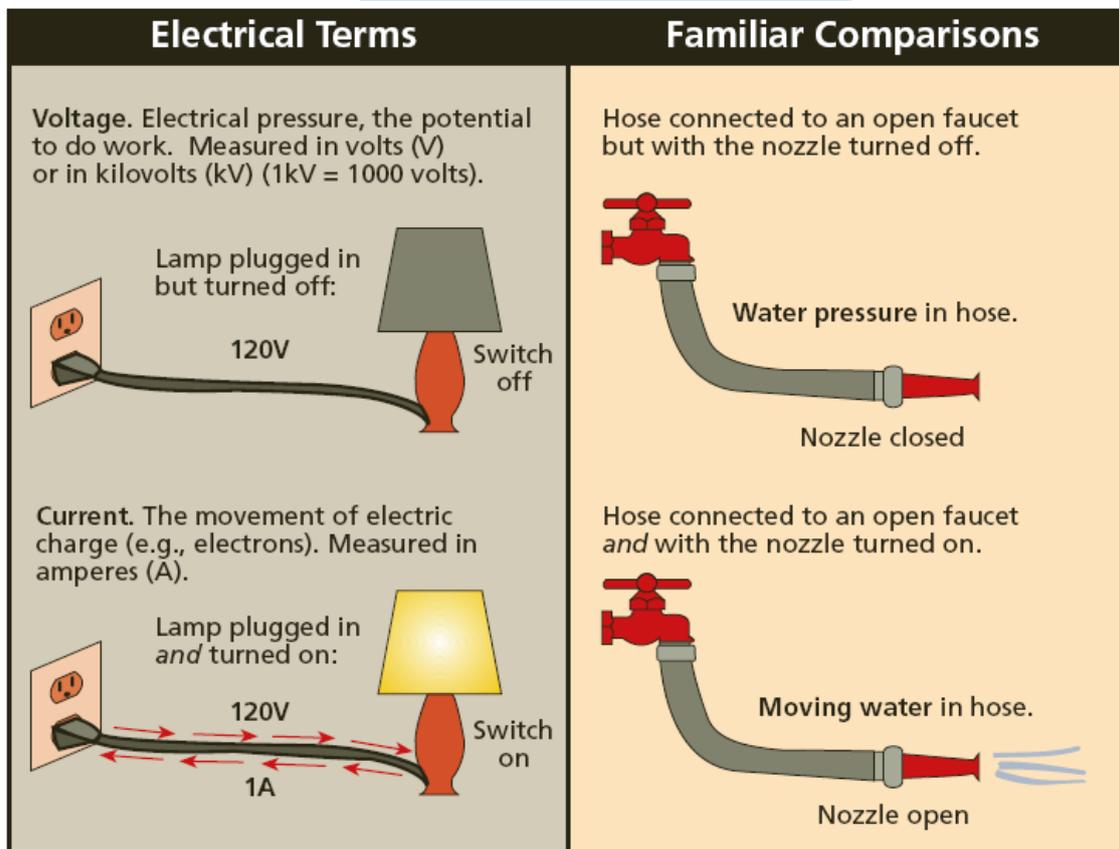
Nota: en la tabla la "coma" debe entenderse por "punto" (1,000=1.000)

Veremos en lecciones siguientes que para describir correctamente el campo electromagnético tanto en el vacío como en medios materiales es necesario emplear cuatro cantidades vectoriales: dos para el campo eléctrico y dos para el campo magnético. Por ahora es suficiente con los CEM empleados.

Para producirse un campo magnético en un equipo eléctrico éste debe estar encendido. Los campos eléctricos están presentes incluso cuando el equipo está apagado, con tal de que permanezca conectado a la fuente de potencia. Es posible que puedan ocurrir subidas de tensión y corriente cuando los dispositivos eléctricos se encienden o apagan. A este fenómeno se le llama transitorio.

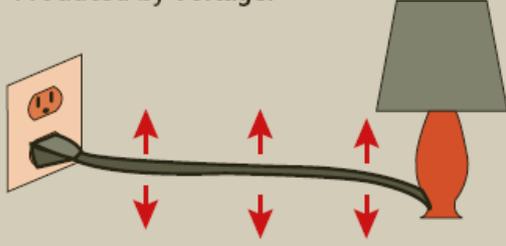
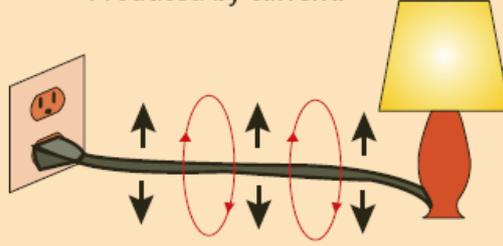
Los campos eléctricos se ven apantallados o debilitados por los materiales que conducen la electricidad, aún cuando esos materiales conduzcan muy pobremente la electricidad, como por ejemplo los árboles, los edificios, y la piel humana. Los campos magnéticos, sin embargo, atraviesan la mayoría de los materiales y es por consiguiente más difícil apantallarlos. Ambos, los campos eléctrico y magnético disminuyen rápidamente cuando la distancia a la fuente aumenta.

Aunque los equipos eléctricos, los aparatos y las líneas de alta o media tensión producen campos eléctricos y magnéticos, las más recientes investigaciones han enfocado un potencial efecto sobre la salud debido a la exposición sólo a campos magnéticos. Esto es porque algunos estudios epidemiológicos han informado sobre el aumento del riesgo de cáncer asociado con las estimaciones de la exposición a campos magnéticos. Ninguna asociación similar se ha encontrado para los campos eléctricos; la mayoría de los estudios realizados no han encontrado efectos biológicos debidos al campo eléctrico.



La tensión o voltaje crea un campo eléctrico y la corriente un campo magnético. Ejemplos de campo eléctrico y campo magnético y similitud con una tubería de conducción de agua.

A Comparison of Electric and Magnetic Fields

Electric Fields	Magnetic Fields
<ul style="list-style-type: none"> • Produced by voltage.  <p style="text-align: center;">Lamp plugged in but turned off. Voltage produces an electric field.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Measured in volts per meter (V/m) or in kilovolts per meter (kV/m). • Easily shielded (weakened) by conducting objects such as trees and buildings. • Strength decreases rapidly with increasing distance from the source. 	<ul style="list-style-type: none"> • Produced by current.  <p style="text-align: center;">Lamp plugged in and turned on. Current now produces a magnetic field also.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Measured in gauss (G) or tesla (T). • Not easily shielded (weakened) by most material. • Strength decreases rapidly with increasing distance from the source.

Un dispositivo eléctrico que se enchufa, es decir que se conecta a una fuente de electricidad tiene un campo eléctrico aún cuando el aparato este apagado. Para producir un campo magnético, el aparato debe estar enchufado y encendido de forma que fluya por él una corriente eléctrica.

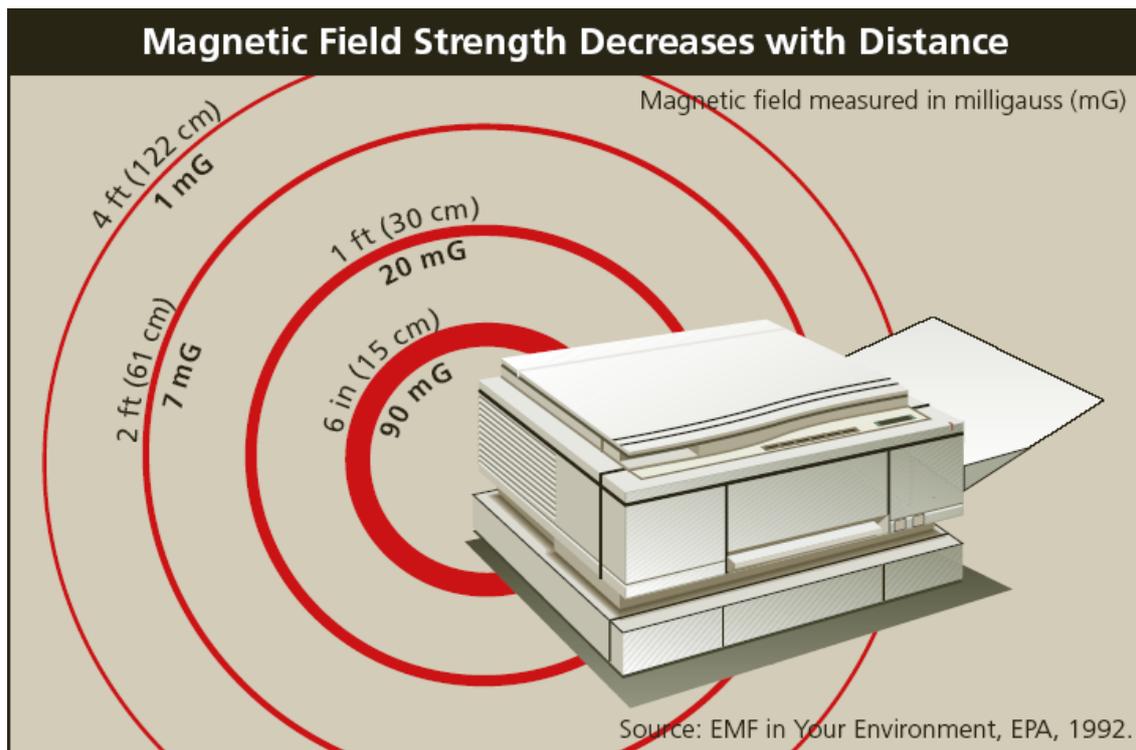


Ilustración de cómo disminuye el campo magnético con la distancia a la fuente.
 Características de campos eléctrico y magnético

Los campos eléctrico y magnético pueden ser caracterizados por su longitud de onda, su frecuencia y su amplitud (que viene a determinar su intensidad o potencia). El gráfico de abajo muestra la forma de onda de un el campo eléctrico o magnético indistintamente.

Frequency and Wavelength

Frequency is measured in hertz (Hz).
 1 Hz = 1 cycle per second.

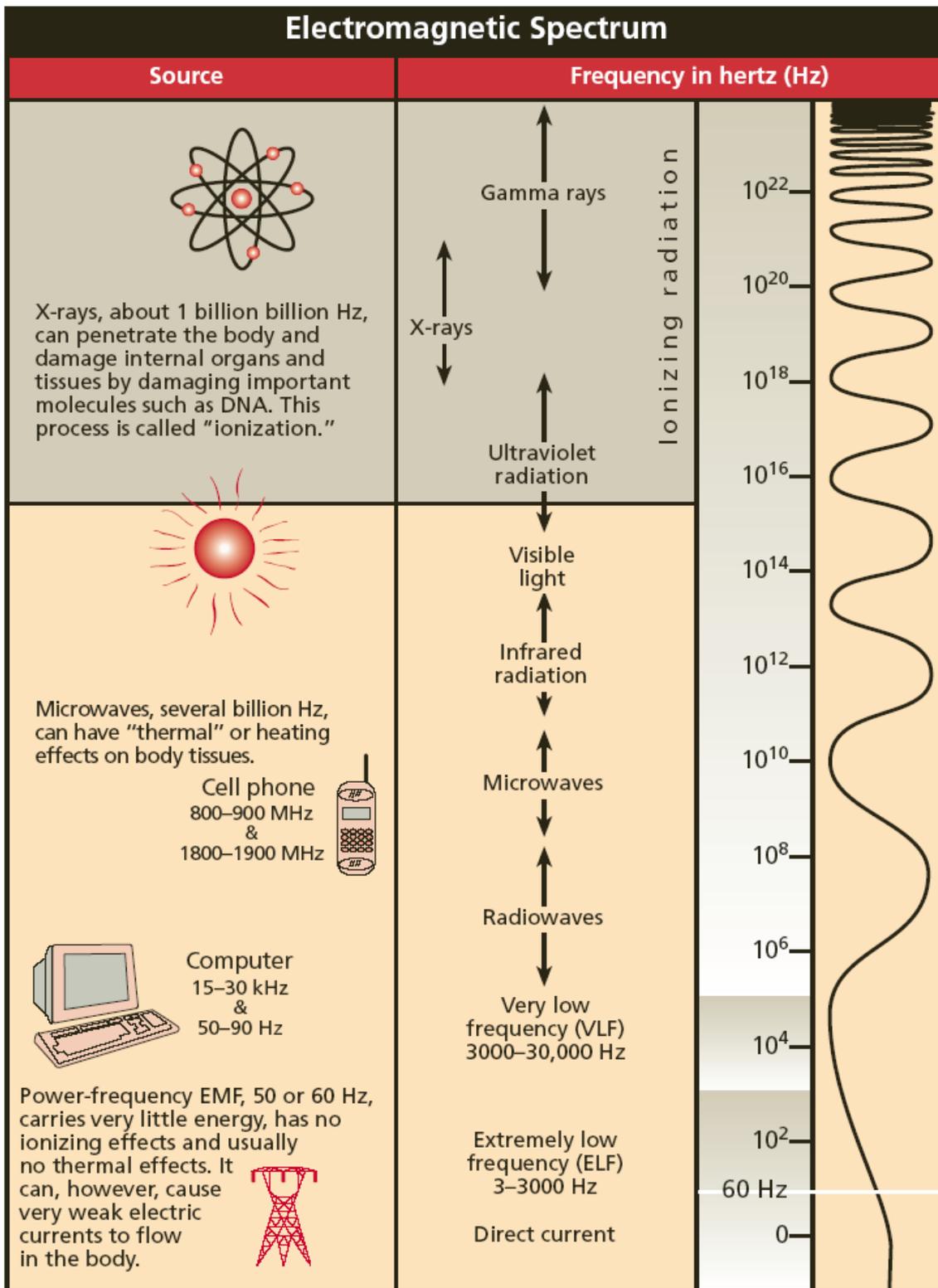
Electromagnetic waveform

Examples:

Source	Frequency	Wavelength
Power line (North America)	60 Hz	3100 miles (5000 km)
Power line (Europe and most other locations)	50 Hz	3750 miles (6000 km)

La dirección del campo alterna de una polaridad a la contraria y vuelta a la primera en un intervalo de tiempo que se llama período. Se dice que la onda ha hecho un ciclo. Si la onda alterna su polaridad una vez en un ciclo se dice que su frecuencia es de un ciclo por segundo, que se denomina Hercio (en honor al físico alemán H. Hertz) y se denota por "Hz". Por tanto, la frecuencia del campo se mide en hercios (Hz), y describe el número de ciclos que ocurren en un segundo. La longitud de onda describe la distancia entre una cresta en la onda y la próxima cresta de la misma polaridad, es decir, marca la longitud que recorre la onda durante un tiempo igual a un período. La electricidad en Europa es alternante de 50 ciclos por segundo, es decir, 50 Hz. En EEUU la frecuencia del campo eléctrico es 60 Hz.

El término ELF aquí empleado se refiere a los campos eléctrico y magnético de frecuencias sumamente bajas como aquellos asociados con el uso de potencia eléctrica, pero también puede usarse en un sentido más amplio, abarcando los campos electromagnéticos a frecuencias no tan bajas o incluso relativamente altas. Por tanto, el término ELF en este documento, se refiere a campos eléctrico y magnético de frecuencia sumamente baja que están en el rango de 3 a 3.000 Hz. Este rango incluye los campos de frecuencia (50 o 60 Hz). Examinar el gráfico siguiente que muestra un esquema del *espectro electromagnético*, es decir, de todas las frecuencias correspondientes al campo electromagnético.



La línea ondulada de la derecha ilustra el concepto de frecuencia: variación más rápida implica frecuencia más alta. Los campos no varían a frecuencia cero y varían varios trillones de veces por segundo en la parte alta del espectro. Notar que 10⁴ es 10x10x10x10, es decir, 10.000 Hz. 1 KiloHercio (KHz)=1.000 Hz. 1 MegaHercio (1MHz)=1.000.000 Hz.

En el rango del ELF, los campos eléctricos y magnéticos no se acoplan o interrelacionan del mismo modo que ocurre a frecuencias más altas. Así que, es más útil referirse a ellos como "los campos eléctrico y magnético" en lugar de "el campo electromagnético", que sería el término más riguroso y adecuado. Este concepto es esencial, y en él incidiremos más veces a lo largo del curso.

Diferencias entre EMF-BF y otros tipos de energía electromagnética.

Los Rayos X, la luz visible, las microondas, las ondas radiofónicas y los campos de ELF son todas formas de energía electromagnética. Una propiedad que distingue las diferentes formas de la energía electromagnética es la frecuencia, expresada en hercios (Hz), del campo que la soporta. Los campos de ELF, de frecuencias de 50 o 60 Hz, tienen una energía muy pequeña, no produce efectos ionizantes y, normalmente, no tiene ningún efecto térmico. Las distintas formas de energía electromagnética pueden tener muy diferentes efectos biológicos sobre nuestro organismo, de la misma forma que diferentes compuestos químicos afectan de diferente forma a nuestro organismo.

Algunos tipos de aparatos u operaciones producen energía electromagnética de frecuencias diferentes. Por ejemplo, en operaciones de soldadura se puede producir energía electromagnética en zonas de frecuencia correspondiente al ultravioleta, visible, infrarrojo y radio-frecuencia, además de los campos de baja frecuencia ELF. Los hornos de microondas producen campos de 50 Hz de varios cientos de milligauss (una milésima de Gauss), pero también crean campos pertenecientes al rango de las microondas dentro del horno, a una frecuencia mucho más alta (aproximadamente 2,45 mil millones de Hz, que se denota por 2,45 GHz y se lee "giga hercio"). Nosotros nos protegemos de los campos de frecuencia más altos dentro del horno, pero no de los campos de 50 Hz.

Los teléfonos móviles funcionan emitiendo campos eléctrico y magnético de alta frecuencia similares a aquellos usados para la radio y transmisiones de la televisión. Los campos de radiofrecuencias y microondas (alta frecuencia que denotaremos por HF -High Frequency, en castellano Alta Frecuencia- o RF -Radio frequency, frecuencias de radio en castellano-) son muy diferentes a los campos de frecuencia baja como los ELF producidas por las líneas de baja, media o alta tensión. Los campos de baja frecuencia presentan básicamente dos grandes diferencias con los campos de alta frecuencia

- Los campos electromagnéticos de ELF son de una naturaleza tal que el campo eléctrico y el magnético pueden existir por separado, es decir, no están acoplados pudiendo en una cierta zona del espacio existir campo eléctrico y no magnético o al revés, que es el caso más habitual. Los en los campos de HF,

por el contrario, el campo eléctrico y el magnético son inseparables y no pueden existir el uno sin el otro. Ello significa que si un cierto material apantalla o elimina un campo (por ejemplo el eléctrico) el otro campo (en este caso el magnético) también desaparece.

- Los campos de ELF básicamente no propagan energía electromagnética por el aire, sino que existen en las zonas próximas a donde discurre la corriente eléctrica (por ejemplo las líneas de alta tensión o un electrodoméstico) y se atenúan muy rápidamente con la distancia. Los campos de HF propagan energía electromagnética por el aire, pues básicamente y en la mayoría de los casos están diseñados para eso (por ejemplo los campos producidos por la telefonía móvil) y también se atenúan con la distancia pero no tan rápidamente con los de ELF.

Diferencias entre fuentes de ELF y fuentes de corriente continua

Algunos aparatos funcionan con corriente alterna (CA) y otros con corriente continua (DC). En la mayoría de los lugares, si un equipo se conecta en un enchufe de pared de casa, está usando corriente eléctrica alterna (CA), que invierte la dirección de la corriente en el cable 50 veces cada segundo, es decir, a 50 Hz. Si el equipo usa baterías, entonces el flujo de corriente eléctrica es en una dirección únicamente. Esto produce un campo magnético estático. Las baterías de algunos equipos pueden producir campos magnéticos que varían con el tiempo como parte de su funcionamiento normal.

¿Qué pasa cuándo nos exponemos a un campo EMF-BF?

En la mayoría de las situaciones prácticas, en DC el campo eléctrico no induce corrientes eléctricas en los humanos. En ambientes industriales existen fuentes de DC altas que pueden inducir corrientes significativas cuando una persona se mueve, y pueden ser motivo de preocupación por poder producir efectos en los dispositivos médicos implantados (marcapasos).

En CA se producen campos eléctricos y magnéticos que crean corrientes débiles en los humanos. Éstas corrientes se llaman "corrientes inducidas." La mayor parte de las investigaciones de cómo pueden afectar en la salud estos campos se ha enfocado a las corrientes CA.

El campo eléctrico

Una persona que está de pie directamente bajo una línea de transmisión de alto-voltaje puede llevarse un susto al tocar algún objeto que conduzca la electricidad. Estas sensaciones son causadas por los fuertes campos eléctricos de las líneas de alta tensión. Esto sólo ocurre en zonas muy próximas a las líneas, ya que el campo eléctrico se debilita rápidamente cuando aumenta la distancia a la línea. El campo eléctrico se debilita y apantalla por edificios, árboles y otros objetos que conduzcan electricidad.

El campo magnético

El campo magnético producido por corrientes alternas (AC) puede inducir un flujo débil de corrientes eléctricas en el cuerpo. Sin embargo, en la mayoría de las situaciones se estima que tales corrientes son más pequeñas que las corrientes eléctricas producidas naturalmente por el cerebro, los nervios y el corazón.

¿Produce la Tierra campo electromagnético ELF?

Sí. La Tierra produce CEM de ELF, principalmente en forma de campos estáticos, similar al campo generados por electricidad de DC. Los campos eléctricos son producidos por la turbulencia aérea y otra actividad atmosférica. El campo magnético de la tierra es de aproximadamente 500 mG, se piensa que es producido por corrientes eléctricas que fluyen profundamente dentro del centro de la tierra. Ya que estos campos son estáticos no inducen corrientes en los objetos inmóviles como hacen los campos asociados con la corriente alterna. Los campos estáticos pueden inducir las corrientes en objetos que están moviéndose o girando.