

CONCEPTOS BÁSICOS DE BIOELECTROMAGNETISMO



**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
Grupo de Electromagnetismo**

**AUTORES:
Miguel Ángel Solano Vérez
Juan Sáiz Ipiña**

INDICE

CONCEPTOS BÁSICOS DE BIOELECTROMAGNETISMO	3
INTRODUCCIÓN.....	3
CONCEPTO DE RADIACIÓN	4
ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO	6
¿QUÉ ES UN CAMPO?.....	8
UN POCO DE HISTORIA: La carga eléctrica.....	9
PROPIEDADES DE LAS CARGAS ELÉCTRICAS	10
CONDUCTORES Y AISLANTES	11
CAMPOS ELÉCTRICO Y MAGNÉTICO	12
Ley de inducción de Faraday: corrientes inducidas.....	16
ECUACIONES DE MAXWELL.....	16
ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS	18
ANTENAS.....	21
Patrones de antena y parámetros de antena	22
ONDAS PLANAS.....	24
PENETRACIÓN DEL CAMPO EN UN MEDIO MATERIAL	28
TIPOS DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS RADIADAS	30
POLARIZACIÓN DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS	31
REFLEXIÓN Y TRANSMISIÓN	31
RESONANCIA ELECTROMAGNÉTICA	32
MODULACIÓN	34
CAMPO ELECTROMAGNÉTICO EN COMUNICACIONES SIN HILOS	36
CAMPO ELECTROMAGNÉTICO EN LA MATERIA: Concepto de SAR.....	37
MÉTODOS NUMÉRICOS PARA CÁLCULO DE SAR.....	40
REFERENCIAS	42
Referencias electromagnéticas	43
Referencias bioelectromagnéticas	43
Referencias web	43
APÉNDICE A	45
APÉNDICE B	47
APÉNDICE C.....	48

CONCEPTOS BÁSICOS DE BIOELECTROMAGNETISMO

Los buenos planetas son difíciles de encontrar. Nosotros tenemos uno bueno y necesitamos administrarlo bien para conservarlo.

INTRODUCCIÓN

Durante mucho tiempo los rayos de las tormentas llamadas con aparato eléctrico, el campo magnético terrestre y la luz visible fueron los únicos agentes electromagnéticos a los que ha estado sometida la humanidad. Pero con la revolución electromagnética que ha tenido lugar en el siglo pasado y, especialmente, en las dos o tres últimas décadas, han surgido nuevas fuentes de campo electromagnético que van desde las líneas de potencia a frecuencias de 50 Hz a los transmisores de radio a frecuencias que van desde unos pocos kilo (10^3) hercios hasta los giga (10^9) hercios, como emisoras de AM y FM, radares, antenas de televisión y telefonía móvil así como a los propios terminales inalámbricos. Estas exposiciones a campos electromagnéticos (CE) son incontroladas en el sentido de que no están diseñadas para ser recibidas por seres vivos sino para cumplir ciertas funciones que la humanidad ha ido creando para mejorar el nivel de vida. Sin embargo, existen otras aplicaciones de los campos electromagnéticos especialmente indicadas para ser recibidas por los seres vivos. Así por ejemplo, el calentamiento con radiofrecuencias se usa en tratamientos médicos diatérmicos, en la fundición de plásticos para moldeamiento por inyección o en cocinar alimentos en un horno de microondas.

Un efecto inmediato de la energía asociada a un campo electromagnético es el calentamiento, que puede ser un efecto benigno si es controlado o perjudicial si no lo es, de cualquier tejido biológico que esté inmerso en dicho campo. Cuando estamos sometidos a un campo electromagnético es necesario cumplir las recomendaciones que los distintos países han previsto como niveles máximos de potencia segura.

La disciplina que estudia la interacción del campo electromagnético sobre los tejidos biológicos se denomina *bioelectromagnetismo*. El carácter de esta interacción puede implicar el estudio de diferentes efectos como corrientes inducidas, potenciales generados o absorción en forma de calor lo cual dependerá del factor que sea más predominante. Las aplicaciones de esta disciplina se extienden desde estudios médicos en el tratamiento de afecciones patológicas hasta el estudio de los posibles efectos adversos que el campo electromagnético, tanto estático como variante en el tiempo, puede ocasionar en el organismo.

Contrariamente a lo que se suele pensarse por el público en general, las especulaciones sobre los posibles efectos a exposición a campo electromagnético comenzaron ya en el siglo XIX en plena efervescencia de conocimiento acerca del electromagnetismo, e investigaciones serias sólo empezaron a realizarse después de la Segunda Guerra Mundial. Es por tanto, esta problemática algo no tan reciente

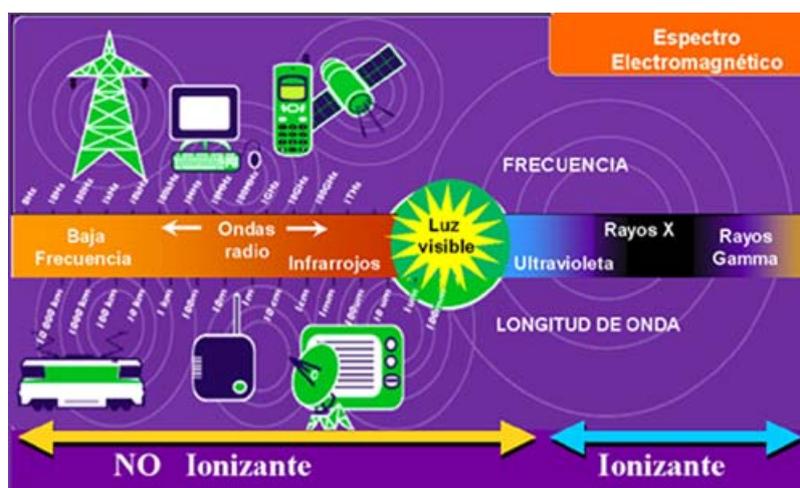
como pudiera parecer. En los años 70 la mayor preocupación eran los efectos sobre la salud de las frecuencias de radio (RF). En los años siguientes, el público comenzó a preocuparse más por los posibles efectos de los campos de extremadamente baja frecuencia (ELF) y en especial los referentes a las líneas de alta tensión. En estos últimos años la preocupación se ha focalizado en la telefonía móvil primordialmente. Hay que entender que la influencia del campo electromagnético sobre los sistemas biológicos es un tema muy complejo que involucra varias áreas de investigación como física, ingeniería, biología, medicina, medioambiente y evaluación y tratamiento de evaluación de riesgos.

Como punto de partida es, en cualquier caso, necesario introducir una serie de conceptos electromagnéticos que nos van a permitir entender cómo interacciona el campo electromagnético con el medio ambiente y en particular con los tejidos biológicos.

CONCEPTO DE RADIACIÓN

Antes de comenzar con diversos conceptos electromagnéticos, es necesario definir un concepto que está presente en cualquier lugar donde se trate el tema de la contaminación electromagnética: es la radiación electromagnética, que se puede definir como el proceso por el cual unas ondas electromagnéticas se trasladan por el espacio acompañadas de una cierta energía capaz de interactuar con el medio por el que se propagan. Desde el punto de vista puramente electromagnético, la zona de radiación está delimitada por unas ciertas condiciones matemáticas que hacen que la densidad de potencia disminuya de forma inversamente proporcional al cuadrado de la distancia a la fuente que produjo el campo electromagnético, lo que indica que los campos eléctrico y magnético disminuyen de forma inversamente proporcional a la distancia a la que se encuentren de la fuente que los produjo. Desde un punto de vista menos estricto podríamos decir que siempre que tengamos una fuente que produzca un campo electromagnético que se propague por una zona dada estará radiando en esa zona, sin hacer demasiadas distinciones en como varía ese campo con la distancia a la que se encuentre de la fuente. En cualquier caso, veremos que es importante, en algunos casos, hacer distinciones entre el tipo de campo producido por una fuente dependiendo de la distancia a la que se encuentre de ella. Por otro lado, hay que hacer una distinción entre lo que se denomina radiación ionizante y no ionizante. Toda onda electromagnética que se propaga por el espacio tiene asociada una energía capaz de interactuar con el ambiente. Como veremos posteriormente, esta energía es proporcional a la frecuencia de la señal a través de una constante denominada constante de Planck. Cuando esta energía es superior a un cierto umbral, lo cual se consigue con señales electromagnéticas de frecuencias muy altas y superiores a 10^{15} hercios (notar que la frecuencia de la señal de la red que alimenta nuestras casas tiene una frecuencia de 50 hercios), es posible que esta energía electromagnética pueda provocar la ionización de las moléculas y dañar la cadena de ADN y se llama radiación ionizante (RI). La RI puede producir efectos dentro del

cuerpo humano mediante el trasvase de energía electromagnética a las células componentes del cuerpo. Por debajo de esa frecuencia la radiación se denomina no ionizante (RNI) cuyos efectos pueden ser térmicos o de otro tipo pero en ningún caso serán capaces de ionizar una molécula. Las radiaciones del campo electromagnético habitual al que todos estamos sometidos son del tipo de radiación no ionizante.



Entre las diversas fuentes de RNI podemos nombrar las siguientes

- Luz ultravioleta:
 - Fuentes: naturales el Sol y artificiales lámparas de vapor de mercurio, lámparas de gases y arcos de soldadura
 - Efectos: especialmente sobre la piel y los ojos, como pigmentación y quemaduras. En exposiciones prolongadas puede producir cáncer de piel y daños irreparable en los ojos.
- Luz infrarroja:
 - Fuentes: naturales el Sol y artificiales las superficies muy calientes (llamas, lámparas de incandescencia etc.)
 - Efectos: básicamente térmicos sobre la piel
- Microondas:
 - Fuentes: artificiales en telecomunicación y radiocomunicación
 - Efectos: dependen de la intensidad del campo radiado y del grado de absorción por parte del medio. Muchos de estos efectos están siendo investigados en la actualidad
- Laser:
 - Fuentes: artificiales a través de emisores Laser
 - Efectos: aplicaciones en tecnología y medicina

- Campos de muy baja frecuencia
 - Fuentes: líneas de transmisión de abastecimiento
 - Efectos: malfuncionamiento en implantes médicos (marcapasos). Efectos debidos básicamente al campo magnético. Efectos bajo estudio.

La protección de este tipo de radiación es muy diversa y de muy variada efectividad. Así es muy costoso apantallar el campo magnético, importante a muy bajas frecuencias, sin embargo es posible apantallar el campo eléctrico con medidas técnicas sencillas en muchos casos. Asimismo, es importante la señalización de las zonas expuestas a radiación especialmente en zona específica de trabajo, es decir, en medidas ocupacionales.

En lo que respecta a la RI podemos nombrar radiación electromagnética tipo rayos X, rayos γ (gamma) y la radiación de partículas tipo radiación α (alfa) y radiación β (beta). Las fuentes artificiales pueden ser una televisión o monitor de ordenador o aplicaciones específica de rayos X en medicina o radiación natural. Fuentes naturales como rayos cósmicos (radiación cósmica) compuestos por ondas y partículas así como la radiación procedente de la desintegración nuclear de isótopos radiactivos.

La energía para ionizar no es la misma para todos los tejidos biológicos. Por ello la división entre RI y RNI no es estricta a partir de una cierta frecuencia. Por ejemplo, la radiación ultravioleta posee energía suficiente para modificar el balance electrónico de la piel de una persona, pudiendo provocar cáncer de piel con exposiciones muy prolongadas. Si cubrimos la piel con un tejido menos susceptible a la ionización por radiación ultravioleta evitamos la ionización.

ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

El espectro electromagnético es el conjunto de las frecuencias de radiación electromagnética. Por espectro radioeléctrico, la Unión Internacional de Radiocomunicaciones define las frecuencias del espectro electromagnético usadas para los servicios de difusión, servicios móviles, de policía, bomberos, radioastronomía, meteorología y fijos.

<i>Denominación</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Longitud de onda</i>
Campos estáticos	0 Hz	-

ELF	3 a 30 Hz	10.000/1.000 Km
VF	0,3 a 3 KHz	1.000/100 Km
VLF	3 a 30 KHz	100/10 Km
LF	30 a 300 KHz	10/1 Km
MF	300 a 3.000 KHz	1.000/100 m
HF	3 a 30 MHz	100/10 m
VHF	30 a 300 MHz	10/1 m
UHF	300 a 3.000 MHz	100/10 cm
SHF	3 a 30 GHz	10/1 cm
EHF	30 a 300 GHz	10/1 mm
Infrarrojo	300 a 3.000 GHz	1/0,1 mm
Visible	$4 \cdot 10^{14}$ a $7,5 \cdot 10^{14}$ Hz	$7,5 \cdot 10^{-5}$ a $4 \cdot 10^{-5}$ mm
Ultravioleta	10^{15} a 10^{17} Hz	
Rayos X	Mayor 10^{17} Hz	10^{-6} a 10^{-8} mm
Rayos gamma	Mayor 10^{19} Hz	10^{-7} a 10^{-11} mm

Es muy habitual reservar el nombre de radiofrecuencias a la banda de frecuencia entre 100 KHz y 300 MHz, mientras que las comprendidas entre 300 MHz y 300 GHz se les denomina microondas. Pero no es la única. Así, se pueden encontrar referencias en donde la banda de ELF va desde 0 hasta 30 KHz, mientras que la banda de 30KHz hasta 300 GHz se denomina Radio Frecuencia (y lleva incluida la banda de microondas), por lo que también se la denota por RF/MW. Por encima del infrarrojo, se encuentra la banda de luz visible (entre $4 \cdot 10^{14}$ y $7,5 \cdot 10^{14}$ Hz). Por encima está el ultravioleta, que ya contiene radiación ionizante y después los rayos-X y los rayos gamma.

Las aplicaciones según el espectro se muestran en la tabla siguiente

Denominación	Aplicaciones
Campos estáticos	<ul style="list-style-type: none"> Trenes levitación magnética Sistemas de resonancia magnética (aplicaciones Médicas) Sistemas electrolíticos (aplicaciones industriales)
ELF	<ul style="list-style-type: none"> Trenes eléctricos (16,66-60 Hz) Generación y transporte de energía eléctrica
VF	<ul style="list-style-type: none"> Voz
VLF - LF - MF - HF	<ul style="list-style-type: none"> Radiodifusión a larga distancia Radionavegación y comunicaciones marinas y aéreas Monitores de televisión y video Detectores antirrobo Cable submarino Radiodifusión de AM

	<ul style="list-style-type: none"> • Banda móvil - radioaficionados
VHF - UHF - SHF	<ul style="list-style-type: none"> • Televisión • Radar, Tierra-satélite, satélite-satélite • Hornos de microondas • Telefonía móvil • Radioaficionados
EHF	<ul style="list-style-type: none"> • Radar • Comunicaciones por satélite • Enlaces de microondas

¿QUÉ ES UN CAMPO?

Un campo es una cantidad física que toma un valor diferente en cada punto del espacio. Existen dos tipos de campos:

- Escalares
- Vectoriales

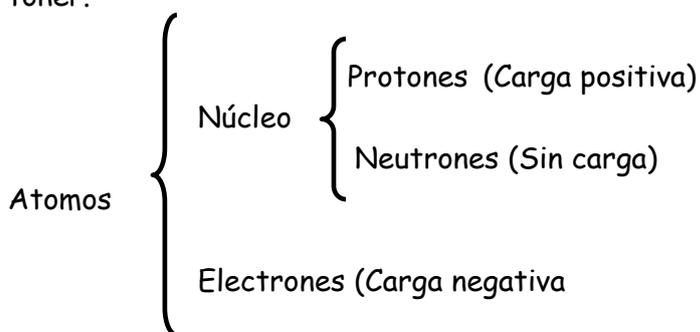
Por ejemplo, la temperatura es un campo escalar que puede ser diferente en cada punto $T(x,y,z)$. Además, puede ocurrir que la temperatura varíe con el tiempo; en ese caso escribiríamos $T(x,y,z,t)$. Otro ejemplo es el "campo de velocidades" de un líquido moviéndose, que dependerá de la posición y del tiempo $\vec{v}(x,y,z,t)$. Este campo es vectorial lo que denotaremos por la flecha superior, en contraposición con un campo escalar que no la tiene. La diferencia entre un campo escalar y un campo vectorial, es que para el primero sólo es necesario conocer su magnitud (caso de la temperatura) mientras que para el segundo no sólo es necesario conocer su magnitud (si el agua se mueve muy deprisa o no) sino su dirección y sentido. Cuando se habla de campo eléctrico y magnético, es necesario conocer que ambos son cantidades vectoriales. Esto tiene unas cuantas implicaciones muy importantes, entre las que nos interesa comentar la suma de dos vectores. Es muy común pensar que, en un punto dado, la potencia que llega procedente de dos fuentes electromagnéticas es mayor (habitualmente el doble) de la que llegaría si sólo hubiese una fuente. Esto puede ser cierto o radicalmente falso, tan falso como que puede ser que no haya campo. Y ello es debido a que el campo electromagnético es una cantidad vectorial. Cuando se suman dos cantidades vectoriales, es decir, dos vectores, no hay que sumar sus magnitudes sino que hay que sumarlos con carácter vectorial y ahí interviene la dirección y el sentido. Por ejemplo, dos vectores de la misma magnitud, dirección y sentido darán otro vector con la misma dirección y sentido pero de magnitud doble. Pero si el sentido fuera contrario, el vector suma es nulo. Y si sumamos dos vectores con diferente direcciones, el vector suma tiene dirección que no es ninguna de las direcciones de los vectores sumandos. De ello existen miles de

ejemplos cotidianos, como la desviación de un avión por el viento o de una barca por la fuerza de la corriente.¹

UN POCO DE HISTORIA: La carga eléctrica

Todos sabemos que cuando frotamos nuestros zapatos en una alfombra de lana y luego tocamos un objeto metálico (el pomo de una puerta o la puerta de un coche) o simplemente damos la mano a otra persona se produce una descarga de electricidad estática. Los átomos se mantienen unidos y no se rompen, aunque las partículas que los constituyen pueden estar moviéndose a velocidades muy altas. Las respuestas a estas y otras cuestiones se obtienen a través de una rama de la Física llamada Electromagnetismo, que podemos definir como el estudio de las interacciones eléctricas y magnéticas. Estas interacciones implican la consideración de partículas con una propiedad denominada carga eléctrica, que es un atributo de la materia tan fundamental como la masa.

Es difícil encontrar una definición de carga eléctrica; sólo se pueden describir sus propiedades y comportamiento. La existencia de la carga eléctrica se conoce desde tiempos de los griegos. Hacia el año 600 a.c. descubrieron que frotando el ámbar con un trozo de lana, aquél podía atraer a ciertos objetos. Decimos que el ámbar ha adquirido una carga eléctrica neta o que se ha cargado. Las piezas de plástico o piel son particularmente adecuadas para mostrar el fenómeno de la electrostática, es decir, la interacción entre cargas eléctricas en reposo (o casi en reposo). Depende de con qué tipo de material frotamos una barra de vidrio (con lana o con seda) quedarán cargadas con un tipo de carga de características opuestas. Benjamin Franklin (1706-1790) llamó a estas cargas positiva y negativa. Dos cargas positivas o negativas se repelen entre sí y dos cargas una positiva y otra negativa se atraen. Existen multitud de aplicaciones de este fenómeno electrostático entre las que cabe mencionar la máquina fotocopidora. La zona de tambor de la máquina cargada positivamente atrae a las partículas del toner cargadas negativamente, formando una imagen sobre el papel en contacto con el toner.



¹ Consultar el apéndice A para una pequeña introducción a operaciones con vectores y escalares

PROPIEDADES DE LAS CARGAS ELÉCTRICAS

Las interacciones responsables de la estructura de los átomos y moléculas son principalmente de naturaleza eléctrica. Por tanto, lo mismo sucede con la estructura y propiedades de la materia que está constituida por átomos y moléculas. La fuerza ejercida por una persona sobre una silla al sentarse, la fuerza adhesiva del pegamento o la tensión en una cuerda son de fundamentalmente de carácter eléctrico y surgen de las fuerzas eléctricas entre partículas cargadas.

La estructura de los átomos se puede describir en términos de tres partículas: los electrones, que tienen carga negativa, los protones que tienen carga positiva y los neutrones que no tienen carga neta. Los protones y los neutrones forman un centro pequeño y muy denso llamado núcleo, con dimensiones de alrededor de 10^{-15} metros. Alrededor del núcleo se mueven los electrones a una distancia del orden de 10^{-10} metros. Para tener una idea de estas distancias, imaginemos un átomo de varios kilómetros de diámetro. Su núcleo sólo tendría el tamaño de una pelota de tenis. Los electrones, cargados negativamente, se mantienen en el átomo debido a la fuerza de atracción eléctrica con el núcleo. Los protones en el núcleo, que se repelen entre sí, se mantienen unidos debido a otra fuerza de tipo nuclear y alcance mucho más corto, que vence a la fuerza eléctrica de repulsión. Aquí podríamos hacer un inciso que tiene que ver con la energía nuclear. Si un núcleo de un átomo tiene muchos protones se hace muy grande y no se mantiene unido. Un ejemplo es el uranio que tiene 92 protones. Las fuerzas nucleares actúan principalmente entre cada protón (o neutrón) y sus vecinos inmediatos, mientras que las fuerzas eléctricas actúan aún a grandes distancias, ocasionando una repulsión entre los protones entre sí. Cuantos más protones haya en el núcleo mayor será esa fuerza de repulsión eléctrica y por tanto, como sucede en el caso del uranio, más débil será el equilibrio y el núcleo estará más cerca de romperse bajo la acción de las fuerzas eléctricas de repulsión. Si se bombardea un núcleo así con partículas como neutrones lentos, se romperá en dos partes, cada una de ellas con carga positiva, que se repelerán entre sí debido a su repulsión eléctrica. La energía que se libera en este proceso es la energía de la bomba atómica. Esta energía se llama energía nuclear, pero en realidad es energía eléctrica liberada cuando las fuerzas eléctricas de repulsión entre las partículas cargadas de un átomo superan a las fuerzas de atracción nuclear que las mantienen unidas.

Las masas de un protón y un neutrón son prácticamente iguales y unas 2000 veces mayor a la de un electrón. La carga negativa de un electrón es la misma en magnitud que la carga positiva de un protón. En un átomo neutro, el número de protones es igual al de electrones y la carga neta (suma algebraica de todas las cargas) es nula. Si un átomo pierda uno o varios de sus electrones queda con un exceso de carga positiva y se llama ión positivo. Por el contrario, un ión negativo es

un átomo que ha ganado algún electrón. A este proceso de pérdida o ganancia de electrones se le llama ionización y es muy importante para diferenciar lo que llamamos radiación ionizante o no ionizante, dependiendo de su capacidad de ionizar o no un átomo.

En los experimentos antes mencionados que fácilmente podemos realizar para demostrar la existencia de cargas eléctricas se cumplen algunas propiedades importantes de conocer. Una es la conservación de la carga. Cuando cargamos un objeto positivamente es porque ha cedido parte de sus electrones a otro. La carga total de ambos objetos se conservará y la carga que pierda uno la ganará otro. Por tanto, en cualquier proceso de carga, ésta no se crea ni se destruye, sólo se transfiere de un cuerpo a otro. En 1909 Robert Millikan (1886-1953) demostró que la carga eléctrica siempre se presenta como algún múltiplo de una cantidad de carga fundamental que es la carga del electrón. Decimos, entonces, que la carga está cuantizada, es decir, la carga eléctrica existe en forma de paquetes discretos. Dicho con otras palabras, la carga eléctrica no puede dividirse en cantidades menores que la carga de un electrón o un protón de forma que la carga adquirida por un cuerpo es siempre un número de veces la carga del electrón o del protón. En los procesos macroscópicos ese número es muy grande y se puede tomar la carga como una magnitud que varía de forma continua.

CONDUCTORES Y AISLANTES

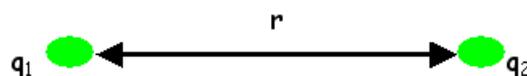
Dependiendo de la facilidad que tienen los materiales para dejar que las cargas se muevan por ellos con facilidad o no, clasificamos los materiales en dos clases: *conductores* y *aislantes*. Se dice que un material es conductor si por él se pueden mover las cargas con bastante libertad; por el contrario, un material es aislante si las cargas no se mueven por él con facilidad. Por ejemplo, la fibra de una alfombra en un día seco es un buen aislante. Al caminar por la alfombra, el roce de los zapatos con la fibra hace que se transfieran cargas al cuerpo, permaneciendo en él porque no pueden fluir a través de la fibra que es un aislante. Si después tocamos un objeto conductor como el pomo de una puerta, se producirá una rápida transferencia de carga, y sentiremos una descarga eléctrica. La mayoría de los metales son buenos conductores y conducen cargas porque los electrones de las capas externas se pueden mover libremente. En un aislante prácticamente no hay electrones libres que se puedan mover. Existen algunos materiales llamados semiconductores que tienen propiedades intermedias que pueden ser modificadas dopándolos con cargas; es el caso del silicio o el germanio.

Finalmente, es conveniente apuntar que el frotamiento no es la única manera de crear materiales cargados. También se pueden crear a través de un proceso de inducción en el que no se produce contacto entre los cuerpos. Asimismo, incluso en un material aislante, las cargas eléctricas pueden desplazarse un poco en presencia

de una carga cercana. De esta forma, es posible entonces que, por ejemplo, un peine pueda atraer pequeños cuerpos cargados o neutros debido a ese desplazamiento de carga. A este proceso se le llama *polarización*. Como vemos, la acción producida por las cargas es capaz de modificar la estructura de la materia mediante un proceso de polarización, al que podríamos llamar efecto bioeléctrico si se tratara de un tejido vivo.

CAMPOS ELÉCTRICO Y MAGNÉTICO

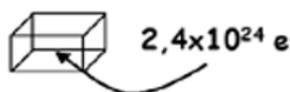
Una vez definido el concepto de carga eléctrica y sus propiedades, se debe describir desde el punto de vista matemático el funcionamiento de la interacción entre cargas para así poder prever los efectos eléctricos. Esta interacción la estudió Charles Coulomb (1736-1806) y enunció lo que ahora conocemos como *ley de Coulomb*: la magnitud de la fuerza eléctrica entre dos cargas puntuales es directamente proporcional al producto de las cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. Como la fuerza es un vector, es necesario definir, además, su dirección y sentido. La dirección de la fuerza de Coulomb es la línea que une las cargas y el sentido es el de atracción para cargas del mismo signo y de repulsión para cargas de signo opuesto. Su módulo está dado por

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$


La unidad de carga eléctrica es el "culombio" y se denota por "C"; el cuanto de carga (carga del electrón es)

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

Un culombio representa el negativo de la carga total de aproximadamente 6×10^{18} electrones. En comparación, un cubo de cobre de lado igual a 1 cm. contiene unos $2,4 \times 10^{24}$ electrones.



El valor de carga de 1 culombio es un valor muy grande. Así, entre dos cargas de 1 culombio se ejercería una fuerza de valor 9×10^9 Newtons (aproximadamente 1 millón de toneladas). La carga total de una pequeña moneda de cobre es de $1,4 \times 10^5$ C, lo que muestra que no podemos perturbar mucho la neutralidad eléctrica sin usar fuerzas enormes. En fenómenos macroscópicos, la carga adquirada por un cuerpo, es un múltiplo enorme de la carga del electrón (en un proceso de carga por frotamiento

se transfieren del orden de 10^{10} electrones) por lo que se puede tomar como una magnitud de variación continua y no discreta. Para ello se define la densidad de carga volúmica " ρ " como la cantidad de carga que existe en la unidad de volumen. Sus dimensiones son C/m^3 .

La ley de Coulomb se generaliza a más cargas sin más que sumar vectorialmente las fuerzas resultantes de la acción de cada carga. Es el llamado *principio de superposición*. En rigor, la ley de Coulomb sólo se aplica a cargas puntuales (o sea muy pequeñas, en el límite ocupando un punto) en el vacío. Si en el espacio entre las cargas existen medios materiales, ya hemos visto que ello produce efectos adicionales de inducción de cargas que modifica la fuerza total resultante.

Desde el punto de vista físico, es muy útil introducir un concepto llamado campo (en este caso vectorial) para modelar lo que sucede en el espacio intermedio entre dos cargas eléctricas que se están ejerciendo una fuerza dada por la ley de Coulomb. Este concepto se llama *campo eléctrico*. La manera de entender este concepto es imaginar una carga puntual con una carga " q " sobre la que otra carga dada ejerce una fuerza. Podríamos considerar que esa fuerza es como una fuerza de "acción a distancia", esto es, como una fuerza que actúa a través del espacio vacío sin necesidad de ningún medio material (como una cuerda o una barra) para transmitirse a través del espacio. Decimos que esa acción a distancia se produce a través de un campo eléctrico creado por esa carga en la posición de la otra. En otras palabras, una carga eléctrica crea una acción que denominamos campo eléctrico en cualquier zona del espacio. Ese campo se manifiesta a través de una fuerza que es la que se ejerce sobre otra carga colocada en el radio de acción de ese campo. Matemáticamente, y simplificando el problema, definimos el campo eléctrico \vec{E} (la flecha indica que es una cantidad vectorial) como el cociente entre la fuerza que ejerce una carga sobre una carga unidad, es decir, la fuerza eléctrica por unidad de carga; así

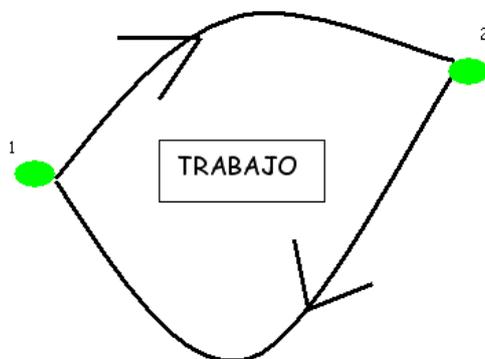
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

Las unidades del campo eléctrico son N/C (Newton/Culombio).

Finalmente, es conveniente introducir el concepto de energía potencial eléctrica y a partir de él el *potencial eléctrico*. Este concepto tiene gran importancia por su valor práctico especialmente en circuitos eléctricos; así, el voltaje o tensión medido entre dos puntos de un circuito no es más que la diferencia de potencial eléctrico entre esos puntos. El campo eléctrico creado por una carga en reposo (campo electrostático) es conservativo. Esto significa que el trabajo² que hay que

² El trabajo es un concepto físico que no vamos aquí a definir matemáticamente. Pero su nombre es ilustrativo de su significado físico: el trabajo para mover algo (una carga en el

realizar para mover una carga de un punto a otro no depende del camino por el que vayamos.



El trabajo necesario para mover una carga desde el punto 1 hasta el punto 2 es el mismo que hay que realizar para moverla desde el punto 2 hasta el punto 1

Por definición, la energía potencial es el negativo de ese trabajo. Con esto, podemos definir la diferencia de potencial entre dos puntos como el cambio en la energía potencial de una carga prueba dividida por el valor de la carga. Su significado es el trabajo que un agente externo debe realizar, por unidad de carga, para mover una carga desde un punto a otro sin cambiar la energía cinética. Por lo tanto, la diferencia de potencial es una medida de la energía por unidad de carga. Las unidades del potencial eléctrico son julios/culombio que se define como Voltio en honor a Volta. Así, podemos decir que hay que realizar un trabajo igual a 1 julio para mover una carga de 1 culombio a través de una diferencia de potencial de 1 voltio. También es conveniente nombrar una unidad de energía utilizada a menudo en física atómica y nuclear: es el electrón-voltio "eV". 1 eV se define como la energía que un electrón (o protón) adquiere al moverse a través de una diferencia de potencial de 1 voltio. 1 eV equivale a $1,6 \times 10^{-19}$ julios. La importancia de conocer el significado de eV es que es la unidad de energía en la que se mide el enlace químico de los átomos para saber que energía electromagnética es capaz de ionizar un átomo.

Cuando las cargas eléctricas están en movimiento se producen además otros efectos que vamos a describir. Siempre que cargas eléctricas del mismo signo se mueven, se dice que existe una corriente eléctrica o simplemente corriente. De forma un poco más precisa, se define la corriente como la cantidad de carga que pasa por una superficie en la unidad de tiempo. La unidad de corriente es el Culombio/segundo que se llama Amperio, en honor a Ampère. Es muy usual definir una cantidad adicional que se llama densidad de corriente. Esta es una cantidad vectorial que tiene por módulo la corriente que por unidad de área, por dirección la

caso electromagnético) de un sitio a otro es la energía que necesitamos para hacerlo. Como el campo electrostático es conservativo, significa que el trabajo para mover una carga de un lugar a otro no depende de por donde lo hagamos. Es como si llevar una mesa de un lado al opuesto de una habitación nos costara el mismo esfuerzo hacerlo por el camino más corto que dar 10 vueltas a la habitación antes de dejarla en su lugar de destino. Ya sabemos que esto no es así pues en ese caso el campo que describe este ejemplo no es conservativo.

perpendicular al área y cuyo sentido es en el que fluye la corriente. Notemos, que estas cantidades son macroscópicas y, por tanto, de variación continua. La densidad de corriente se relaciona con la densidad de carga a través de la ecuación

$$\vec{J} = \rho \vec{v}$$

donde \vec{v} es la velocidad a la que se mueven las cargas.

Todos conocemos las fuerzas magnéticas. Sin ellas no habría motores eléctricos, ni tubos de imagen, ni altavoces, ni diskettes para los ordenadores. Los aspectos más familiares del magnetismo son los asociados con los imanes permanentes, que atraen objetos no magnetizados de hierro y atraen o repelen a otros imanes. La aguja de una brújula, que se alinea con el campo magnético de la Tierra, es otro ejemplo. Sin embargo, la naturaleza fundamental del magnetismo es la interacción entre las cargas eléctricas en movimiento. Esta es una diferencia esencial entre las fuerzas eléctricas y las magnéticas: las primeras actúan sobre las cargas en reposo o en movimiento mientras que las segundas sólo lo hacen sobre las cargas en movimiento. Al igual que la fuerza eléctrica, describiremos las fuerzas magnéticas utilizando el concepto de campo. Así, podemos describir las interacciones magnéticas diciendo que una carga en movimiento o una corriente producen un *campo magnético* en el espacio circundante. Este campo magnético ejerce una fuerza \vec{F} sobre cualquier carga "q" en movimiento o corriente que se encuentre en ese campo. Los experimentos realizados sobre el movimiento de partículas cargadas que se mueven en el seno de un campo magnético, han demostrado que la fuerza magnética que actúa sobre una partícula de carga "q" que se mueve a velocidad "v" en el seno de un campo magnético que denotaremos \vec{B} es

$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}$$

que muestra que la fuerza es proporcional a la carga, a su velocidad y al campo magnético y su dirección es perpendicular a los vectores \vec{v} y \vec{B} . Es importante notar que la fuerza magnética no puede modificar la velocidad de una partícula. Las unidades empleadas para el campo magnético \vec{B} (que llamaremos inducción magnética o densidad de flujo magnético) se llaman Teslas (T) o Weber/m² (Wb/m²) en honor a Tesla y Weber, respectivamente. También, se utiliza otra unidad llamada Gauss (G), correspondiente a otro sistema de unidades. La relación entre ellas es: 1T=10⁴ G.

³ Consultar el apéndice A sobre operaciones con vectores

Los imanes de laboratorio habituales pueden producir campos magnéticos de 2,5 T y existen imanes superconductores de 25 T. El campo magnético terrestre es del orden de $0,5 \times 10^{-4} \text{ T} = 50 \mu\text{T}$ ($1 \mu = 10^{-6}$). La expresión de la fuerza puede fácilmente generalizarse al caso de corrientes en un conductor. Finalmente, un experimento simple realizado por primera vez por Oersted en 1820 demostró claramente el hecho de que un conductor que lleva una corriente produce un campo magnético que está descrito por la *Ley de Ampère* (que no escribiremos por ahora).

Ley de inducción de Faraday: corrientes inducidas

Fueron Michael Faraday y Joseph Henry en 1831 (de forma independiente), los que demostraron experimentalmente que un campo magnético variable en el tiempo induce una corriente en un hilo conductor. Estos resultados se traducen en una muy básica e importante ley del Electromagnetismo que se conoce como *ley de inducción de Faraday*.

La aplicación más básica de este fenómeno son los generadores y motores. Con esto se relacionan dos fenómenos físicos que hasta entonces no tenían puntos en común. Los fenómenos eléctricos y los fenómenos magnéticos no son más que dos aspectos de una misma interacción: la electromagnética. Como vemos, ahora hemos introducido una nueva variable de dependencia de los campos eléctrico y magnético que es el tiempo. Hasta ahora los campos dependían únicamente de la posición y la única variación temporal es la que ocurre con la corriente que proviene de la variación temporal de las cargas. Estos campos descritos anteriormente son campos que denominamos electrostático y magnetostático pues son independientes del tiempo. De hecho, el campo magnetostático es creado por corrientes llamadas estacionarias, pues cumple una ecuación que se llama ecuación de continuidad cuando la variación temporal es nula, es decir, cuando no hay variación de la densidad de carga volumétrica ρ con el tiempo. Ello implica que las líneas de corriente son cerradas. Sin embargo, después de Faraday queda claro que un campo magnético variable con el tiempo induce un una fuerza electromotriz en un circuito es decir, un campo eléctrico.

ECUACIONES DE MAXWELL

Quedaba ver que un campo eléctrico variable en el tiempo crea un campo magnético. Esto lo formuló teóricamente Maxwell (James Clerk Maxwell) en sus famosas ecuaciones, que son las siguientes:⁴

⁴ El símbolo ∇ es un operador matemático llamado gradiente. Su descripción matemática no tiene importancia en este contexto. Lo único importante es saber que el operador gradiente significa derivar –calcular la variación– respecto a la posición la cantidad vectorial a la que se aplica.

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{E}(x, y, z, t) &= -\frac{\partial \vec{B}(x, y, z, t)}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{H}(x, y, z, t) &= \vec{J}(x, y, z, t) + \frac{\partial \vec{D}(x, y, z, t)}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{D}(x, y, z, t) &= \rho \\ \nabla \cdot \vec{B}(x, y, z, t) &= 0\end{aligned}$$

La idea esencial de Maxwell fue la introducción de un término que se llama densidad de corriente de desplazamiento en la ecuación de Ampère (la segunda), con los mismo efectos que la corriente de conducción en un conductor pero que puede existir en el vacío. Con ello todas las ecuaciones que describían hasta entonces los fenómenos eléctricos y magnéticos eran consistentes con la experiencia de campos variables en el tiempo de forma genérica.

Las ecuaciones de Maxwell son tan fundamentales para los fenómenos, que a partir de ahora llamaremos electromagnéticos, como lo son las leyes de Newton para el estudio de los fenómenos mecánicos. En realidad, la teoría elaborado por Maxwell fue de mucho mayor alcance de lo que él imaginó en su época, ya que resultaron estar en completo acuerdo con la teoría especial de la relatividad que Einstein formuló en 1905. Las ecuaciones de Maxwell, no sólo predicen los fenómenos electrostáticos y magnetostáticos, sino que predicen la existencia de *ondas electromagnéticas* que transportan energía por el vacío a una velocidad "c" igual a la de la luz ($c=3 \cdot 10^8$ m/s en el vacío) cuando las cargas que producen el campo electromagnético están aceleradas.

Antes de finalizar con las ecuaciones que rigen los fenómenos electromagnéticos, es conveniente introducir las ecuaciones denominadas relaciones de constitución que permiten caracterizar las características eléctricas y magnéticas de los materiales. Cuando el campo eléctrico y magnético se trata en medios materiales se introducen unos nuevos campos eléctrico y magnético que son los vectores \vec{D} y \vec{H} ; al primero se le llama vector desplazamiento o densidad de flujo eléctrico (unidades de C/m²) y al segundo simplemente campo magnético (unidades de A/m). Su relación con los anteriores campos definidos es

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad \text{y} \quad \vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

siendo μ la permeabilidad y ε la permitividad del medio.

ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

No es necesario entender el significado exacto de las ecuaciones de Maxwell en cuanto a la notación que en ella se emplea. Simplemente, es necesario entender que todas las cantidades que en ellas intervienen son dependientes de la posición en el espacio y del tiempo y que el campo eléctrico (bien \vec{E} o \vec{D}) y el campo magnético (bien \vec{B} o \vec{H}) están interrelacionados. Así una variación del campo eléctrico \vec{E} con la posición produce necesariamente una inducción magnética \vec{B} , relacionado con \vec{H} , cuya variación con el tiempo produce un vector desplazamiento \vec{D} , relacionado con \vec{E} , que vuelve a producir un campo \vec{B} y así sucesivamente. Así, las ecuaciones de Maxwell predicen la existencia de ondas electromagnéticas que se propagan a través del espacio a la velocidad de la luz. Esta predicción teórica fue confirmada experimentalmente por Hertz, que fue el primero que construyó una antena capaz de generar ondas electromagnéticas propagándose por el aire y detectarlas con otra antena. Este hecho, ha dado origen a multitud de dispositivos prácticos de comunicación sin hilos como la radio, la televisión o el radar. Desde el punto de vista conceptual, Maxwell unificó los conceptos de luz y electromagnetismo desarrollando la idea de que la luz es una forma de radiación electromagnética.

Las funciones solución de las ecuaciones de Maxwell tienen carácter ondulatorio, lo que quiere decir que los campos electromagnéticos se presentan en general en forma de onda. Una forma sencilla de ilustrar el comportamiento de una onda en su recorrido consiste en dejar caer una piedra en un estanque con el agua en reposo. Se generan ondas producidas por la oscilación del agua, que viajan hacia afuera del punto donde se tiró la piedra a una velocidad determinada por los parámetros del agua⁵. Un corcho flotando en el estanque se movería de arriba hacia abajo al pasar las ondas. Al viajar, esta onda de agua presenta un movimiento oscilatorio para un observador en una posición fija, como la del corcho. Pero si se toma una instantánea de las ondas en un instante de tiempo también se tiene un patrón oscilatorio con la distancia. Finalmente, si el corcho colocado en la cresta de una onda se desplazara con ella, sólo observaría un patrón fijo puesto que viajaría con la onda a la velocidad de ésta. El comportamiento de una onda viajera electromagnética se puede comprender mejor con esta analogía.

La resolución de las ecuaciones de Maxwell no es tarea sencilla. Su estudio se limita la mayoría de las veces a lo que se denominan ondas monocromáticas o

⁵ Notemos que la velocidad de las ondas en el agua no dependen del peso de la piedra o la velocidad a la que se tiró. De ello depende el tamaño de las ondas (su potencia).

monocromáticas. Éstas son ondas cuya variación con el tiempo es de la forma $\cos(\omega t)$.

Es muy importante diferenciar entre las posibles soluciones del campo electromagnético a que da lugar la resolución de las ecuaciones de Maxwell. Por supuesto, no es el objetivo de esta asignatura el estudiar los posibles métodos de solución ni siquiera en los casos más sencillos, pero sí es necesario entender, dependiendo del rango de frecuencias o de la zona del espacio en que nos encontremos, que características esenciales y diferenciadores tiene el campo electromagnético. En primer lugar es necesario decir que el campo electromagnético se genera en lo que se llaman fuentes que, desde el punto de vista conceptual, son las cargas y las corrientes (cargas en movimiento). La rapidez en el cambio del estado de movimiento de las cargas determina la frecuencia del campo generado. Dependiendo de si nos encontramos cerca o lejos de las fuentes el campo tiene características diferentes. En general, es posible escribir el campo electromagnético como

$$\vec{E} = \vec{E}_i + \vec{E}_R$$

$$\vec{H} = \vec{H}_i + \vec{H}_R$$

donde los campos con subíndice "i" se llaman *campos de inducción* y los que tienen subíndices "R" campos de *radiación*. Los campos de inducción sólo son importantes cerca de las fuentes y los campos de radiación lejos de ellas. Además, es posible demostrar las siguientes dependencias

$$\begin{pmatrix} \vec{E}_i \\ \vec{B}_i \end{pmatrix} \text{proporcional a } \left(\rho, \vec{J}, \frac{1}{r^2} \right) \quad ; \quad \begin{pmatrix} \vec{E}_R \\ \vec{B}_R \end{pmatrix} \text{proporcional a } \left(\frac{\partial \rho}{\partial t'}, \frac{\partial \vec{J}}{\partial t'}, \frac{1}{r} \right)$$

lo que muestra que los campos de inducción se atenúan mucho más rápidamente con la distancia (r) que los campos de radiación. Por tanto como primera diferenciación podemos decir que cerca de las fuentes los campos son básicamente campos de inducción, y no hay propagación de energía, y lejos de las fuentes los campos son básicamente de radiación y hay propagación de energía.

En relación con la frecuencia la distinción es importante. A frecuencia nula, es decir $f=0$, los campos se llaman estáticos y en este caso el campo eléctrico (electrostático) y magnético (magnetostático) son independientes no estando ligados entre sí; además, los campos son de tipo inductivo y no hay propagación de la energía. Cuando la frecuencia no es nula, los campos eléctrico y magnético están ligados entre sí. Sin embargo, a frecuencia bajas (ELF: Extremely Low Frequencies) las "cosas" no suceden de forma muy diferente al caso estático y podemos afirmar

que, muy aproximadamente, los campos son casi como si fueran estáticos (se llaman campos "cuasiestáticos"). Por tanto, a estas bajas frecuencias los campos son básicamente de inducción y no existe propagación de la energía. Ese es el caso de las líneas de alta tensión o los transformadores en electrodomésticos. En ambos casos, los campos eléctrico y magnético "van" por separado; ello quiere decir que es posible eliminar el campo eléctrico o el magnético pero sigue existiendo el otro campo no eliminado. A medida que la frecuencia va aumentando, los campos eléctrico y magnético se van acoplando, de forma que ya no se habla de campos por separado sino de *campo electromagnético* como un todo, unión de los campos eléctrico y magnético. En este caso el campo de inducción es despreciable predominando el campo de radiación (exceptuando si estamos cerca de las fuentes). Este es el caso de las antenas de telefonía móvil, como caso más de moda, pero existen otras muchas fuentes como las antenas de televisión, los radares de comunicaciones, la telefonía inalámbrica etc. Existen también campos de baja frecuencia naturales como los de las tormentas (15-20 KV/m) o el campo magnético terrestre (40-50 μ T). Tengamos en cuenta que la separación entre estar o no en baja frecuencia no es un valor fijo e inalterable. Podemos fijarlo en torno a 10⁵ Hz (100 KHz)⁶ pero sólo hay que tomarlo como una estimación. La siguiente tabla resume los conceptos anteriores.

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

ρ	J	E_I	B_I	E_R	B_R	f
cte	0	!	0	0	0	0
0	cte	0	!	0	0	0
$\frac{\partial \rho}{\partial t} \downarrow$	$\frac{\partial J}{\partial t} \downarrow$!	!	≈ 0	≈ 0	$0 < f < 10^5$ Hz ?
$\frac{\partial \rho}{\partial t} \uparrow$	$\frac{\partial J}{\partial t} \uparrow$	-	-	!	!	$f > 10^5$ Hz ?

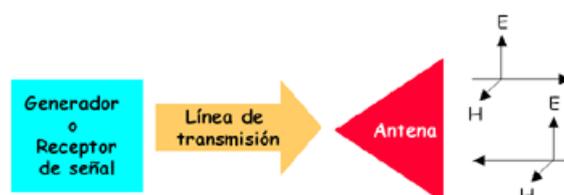
Campos de inducción y radiación. Las casillas con ! indican un campo presente. (Cortesía de J. Margineda).

⁶ Es posible que en algunos otros sitios a lo largo de la asignatura se pueda decir que la separación entre baja y alta frecuencia sea 30 KHz. No hay un valor concreto que nos permita poner de acuerdo a todos. En cualquier caso, eso no es importante, pues es evidente que las "cosas" no cambian, en general y salvo excepciones resonantes, abruptamente con la frecuencia. De forma más o menos general podemos decir que el paso de baja a alta frecuencia se va produciendo gradualmente en frecuencias comprendidas entre los 30 y los 100 KHz.

ANTENAS

Hemos visto que las ecuaciones de Maxwell predicen la propagación de una onda electromagnética por el aire (o el vacío) sin necesidad de un medio que la soporte, a diferencia, por ejemplo, de la propagación del sonido que se hace por cambios de presión y necesita de un medio material para propagarse. Una onda electromagnética se produce en algún sitio y a través de algún dispositivo apropiado. Una **antena** es una estructura diseñada para radiar o recibir energía electromagnética al o del espacio que lo rodea de una forma eficiente. Por tanto, una antena es una fuente de campo electromagnético, lo que en términos electromagnéticos se traduce en cargas y corrientes que varíen con el tiempo. De hecho cualquier carga que se mueva con un movimiento no uniforme radia energía electromagnética. Cualquier medio que sirva para transportar energía electromagnética a través de un medio material radia. Por ejemplo, un cable coaxial de los habituales para conectar la televisión a la antena (al conector de la pared) si lo dejamos al aire es una antena; si pudiésemos poner en funcionamiento un horno de microondas con la puerta abierta (algo que afortunadamente no se puede hacer) se comportaría como una antena. Por tanto, cualquier objeto por el que circule una corriente variable con el tiempo es una antena y radia energía electromagnética. Es por tanto, muy fácil construir una antena. Algo más complicado es construir una "buena" antena, es decir, un dispositivo que radie la energía electromagnética de forma apropiada, en las direcciones apropiadas y con la máxima eficiencia. Si colocásemos un cable coaxial abierto al aire y conectado a una fuente de corriente alterna tendríamos campo radiado, pero con una eficiencia muy pobre pues la mayor parte de la energía transportada por el coaxial se reflejaría y no pasaría al aire para propagarse por él. Pero si les damos una forma especial a sus conductores, bien en forma de hilo rectilíneo o de lazo, conseguimos que la transición entre el aire y el coaxial sea mejor, la mayor parte de la energía pase al aire y, además, podemos decidir en que dirección queremos que se radie la máxima energía mediante el diseño apropiado. Dependiendo de múltiples aspectos como frecuencia, alcance, potencia de emisión etc. existen múltiples tipos de antenas, desde las antenas de hilo, antenas de apertura o antenas parabólicas.

El diagrama de sistema emisor o receptor es



No es el objeto de estas notas realizar un análisis exhaustivo de cómo radia una antena. Sólo vamos a describir de forma simple algunas de sus características

más importantes y qué es necesario conocer para tener una visión global del campo electromagnético.

En su forma más elemental, una carga acelerada es una antena, en el sentido en que produce radiación. Si se calcula el campo electromagnético producido por tal carga se demuestra que

- El campo eléctrico puede dividirse en dos sumandos: $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$. El primero \vec{E}_1 sólo depende de la velocidad de la carga y el segundo \vec{E}_2 depende, además, de su aceleración. Si la carga se moviese con movimiento uniforme sólo existiría el primer sumando
- El valor absoluto de \vec{E}_1 , a grandes distancias de la carga, disminuye según $1/r^2$ (siendo r la distancia a la carga). Además \vec{E}_1 tiene siempre una componente de campo dirigida según la dirección \vec{r} . A este campo se le llama *campo de inducción*.
- El segundo sumando \vec{E}_2 es siempre perpendicular a \vec{r} y a la aceleración, es decir, es un campo transversal a la dirección de propagación. Además, este sumando disminuye a grandes distancias de la carga como $1/r$, por lo que, en zonas alejadas de la carga, $\vec{E} \approx \vec{E}_2$. A este campo se le llama *campo de radiación*.
- Si se calcula la densidad de potencia media transportada por la onda se obtiene que es igual a la transportada por el campo de radiación. El campo de inducción no transporta energía sólo la almacena en las proximidades de la carga.

En resumen, en las proximidades de una antena es importante el campo de inducción, que tiene un carácter cuasiestático y cuyo cálculo es muy complicado. En las lejanías de la antena sólo el campo de radiación es importante, y su obtención es, en general, mucho más simple. Siempre nos referiremos al campo de radiación cuando nos referimos al campo radiado por una antena. Su conocimiento nos dará todos los parámetros característicos de una antena que vamos a pasar a describir

Patrones de antena y parámetros de antena

Una característica esencial de una antena es la forma del campo electromagnético que produce a su alrededor. Decimos que una antena es isótropa u omnidireccional cuando radia igual en todas las direcciones del espacio. En la realidad, una antena no radia igual en todas las direcciones. Puede ser, que una antena radie igual en todas las direcciones en, por ejemplo, un plano. Entonces,

decimos que es omnidireccional en ese plano. El gráfico que describe la intensidad del campo en la zona lejana en función de la dirección para una distancia a la antena dada se llama *patrón de radiación de la antena*. En general un patrón de radiación es tridimensional. La dificultad para realizar e interpretar gráficos tridimensionales se suele evitar realizando diagramas separados de magnitud del campo en dos planos dados: uno llamado patrón plano-E y otro llamado patrón plano-H. Es también conveniente definir la *intensidad de radiación* como la densidad de potencia media temporal por unidad de ángulo sólido (se mide en vatios/estéreo-radián). La región de máxima radiación entre los dos primeros puntos nulos del patrón se llama *haz o lóbulo principal* y las regiones de menor radiación *lóbulos laterales*. Los parámetros que caracterizan el patrón son

- **Anchura del lóbulo principal (o anchura de haz):** describe la estrechez del haz principal y habitualmente se define entre los puntos de media potencia (puntos de 3 dB, donde la potencia radiada es la mitad de la potencia máxima en el haz).
- **Nivel de lóbulo lateral:** los lóbulos laterales de una antena no isotrópica representan regiones con radiación no deseada y por ello deben tener niveles lo más pequeños posibles.
- **Ganancia directiva:** el ancho de haz describe lo afilado que es el lóbulo principal pero no proporciona ninguna información acerca del resto del patrón. Por ejemplo, los lóbulos laterales pueden ser muy altos (situación no deseada). Para ello se define un parámetro llamado *ganancia directiva* que mide la habilidad de la antena para radiar en una determinada dirección y viene a indicar cuánto de más radia una antena en una dirección dada de lo que radiaría una antena isotrópica que radiase una potencia total igual a la que radia la antena en cuestión.
- **Directividad:** A partir de la ganancia directiva se define la directividad como la máxima ganancia directiva. La directividad nos da idea, entonces, de cuanto de más, respecto a una antena isotrópica, radia una antena en la dirección de máxima radiación.

Estos parámetros son parámetros característicos del patrón de radiación de una antena; sin embargo, no cubren información respecto a la impedancia de entrada a la antena, es decir, su eficiencia cuando se conecta a un circuito alimentador. La medida de la eficiencia de una antena la da la *ganancia en potencia* o simplemente *ganancia* y se define, referida a una antena isotrópica, como la razón de su máxima intensidad de radiación respecto a la intensidad de radiación de una antena isotrópica sin pérdidas con la misma potencia de entrada. Con este parámetro se tienen en cuenta las posibles pérdidas óhmicas. El cociente entre la directividad y la ganancia

se llama *eficiencia de radiación*. Normalmente, la eficiencia de una antena bien construida es próxima al 100%.

Un parámetro normalmente utilizado para medir la cantidad de potencia radiada por una antena es la *resistencia de radiación* que es el valor de una resistencia hipotética que disiparía la misma cantidad de potencia que la potencia total radiada por la antena cuando la corriente que alimenta la antena es igual a la corriente que pasa por esa resistencia.

El campo producido por una antena en la zona de radiación (zona lejana de la antena) es una onda de tipo esférico. Para una de las componentes del campo, se tendría una expresión del tipo siguiente

$$E_j = \frac{E_0}{r} \cos(\omega t - k_0 r)$$

donde E_0 es la amplitud, ω es la frecuencia angular y k_0 es el número de onda en el vacío (es decir, la constante de fase $k_0 = \omega/c$). Como vemos, la fase es constante en un círculo alejado una distancia "r" de la antena y la amplitud disminuye con el inverso de "r". Sin embargo, cuando la distancia "r" es muy grande, esta onda esférica puede considerarse como una onda plana, es decir, una onda con el frente de onda plano. No basta decir que esto sucede cuando "r" es muy grande, sino que lo que hay que indicar es que "r" es muy grande comparado con alguna otra cantidad. En términos generales, podemos decir que estamos en la zona de radiación, es decir, los campos de inducción son despreciables, cuando "r" es mucho mayor que la longitud de onda en el vacío que es $\lambda_0 = c/f$, siendo "f" la frecuencia de la señal emitida por la antena.

ONDAS PLANAS

El tipo de solución más sencilla de las ecuaciones de Maxwell son las ondas planas. Estrictamente hablando, es imposible conseguir una onda plana monocromática puesto que exigiría una excitación sinusoidal perfecta (amplitud y frecuencia constantes) durante un período de tiempo infinito, su estudio es muy importante ya que,

- En muchos casos, los campos reales son aproximadamente monocromáticos.
- Cualquier otro tipo de solución no monocromática puede expresarse como una combinación lineal de soluciones monocromáticas
- Permiten introducir conceptos básicos de interacción electromagnética
- Son una muy buena aproximación del campo electromagnético existente en zonas alejadas de las fuentes que los originan (de hecho, cuando se realizan

medidas de radiación en la zona de campo lejano de una antena, se dice que se hacen medidas de onda plana)

Existen diversas formas de definir una onda plana. Desde el punto de vista más formal, una onda plana es cualquier solución de las ecuaciones de Maxwell que dependa únicamente de una coordenada y del tiempo. Las consecuencias de esta definición (que a su vez pueden tratarse como definición) son que, si definimos un frente de ondas como la superficie donde el campo es constante para un instante de tiempo dado, para una onda plana se cumple que

- El frente de onda es un plano
- La dirección en la que se propaga la onda plana es perpendicular al frente de onda
- El campo eléctrico y la inducción magnética son siempre, en cualquier instante de tiempo, perpendiculares entre sí y además, perpendiculares a la dirección de propagación que denotaremos \vec{n} . Es más, los vectores \vec{E} , \vec{B} y \vec{n} forman un triédro recto.

Con estas condiciones, se dice que una onda plana es una onda transversal electromagnética (TEM). Su característica esencial es que no hay ninguna componente de campo electromagnético en la dirección de propagación de la energía y que la velocidad a la que se propaga la energía es la velocidad de la luz en el medio. Para el vacío se llama "c" ($c=3 \times 10^8$ m/s). Es necesario apuntar que no todas las soluciones de las ecuaciones de Maxwell son de tipo TEM.

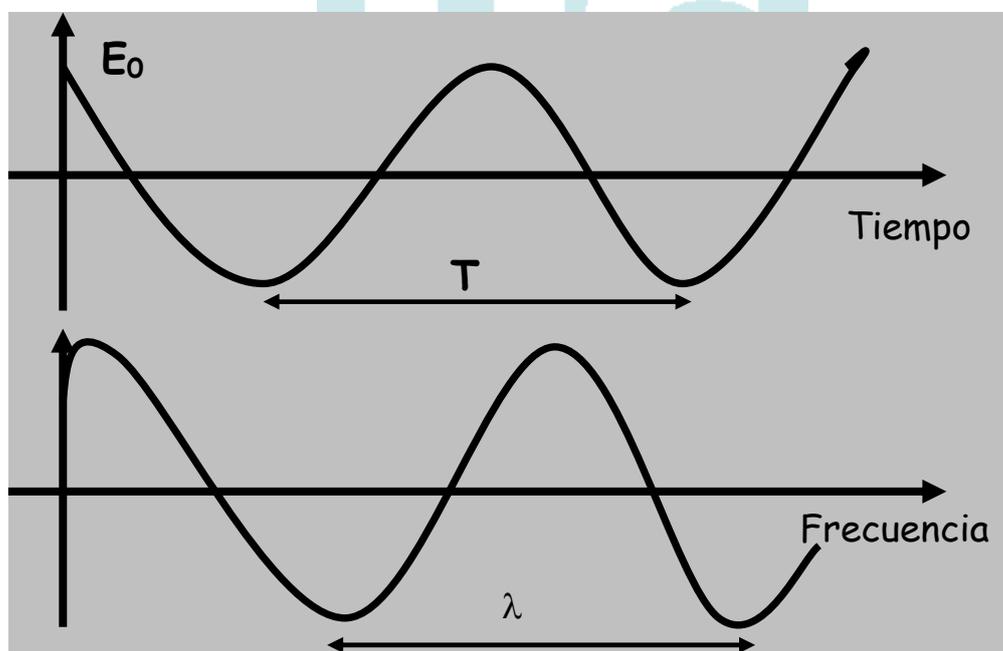
La ecuación para el campo eléctrico de una onda plana que propaga la energía en la dirección positiva del eje "z" es de la forma

$$\vec{E}(z,t) = \vec{E}_0 \cos(\omega t - k z) = \vec{E}_0 \cos(2\pi f t - k z)$$

y otra similar para el campo magnético que no es necesario escribir. Su representación se puede ver en la figura. Esta expresión tiene dos partes: una dada por \vec{E}_0 que da la amplitud de la onda y otra que tiene que ver con el resto (la función cos) que da la fase de la onda. Cuando los puntos del espacio en los que la fase de una onda es constante se encuentran sobre un plano, a esa onda se le llama onda plana. Es importante reconocer los parámetros que intervienen en esa ecuación y algunos derivados que no intervienen explícitamente:

- \vec{E}_0 : vector denominado *amplitud* de la onda plana. Determina la amplitud de la oscilación del campo eléctrico y por tanto la potencia transportada por la onda. A mayor valor de la amplitud más potencia transportada. Siguiendo con la analogía del agua, indicaría el tamaño de la onda (ola) y por tanto, la cantidad de agua que llega a la orilla.

- T : período. Es el intervalo de tiempo que pasa hasta que la amplitud del campo vuelve a tomar el mismo valor, es decir, hasta que recorre un ciclo completo. Se mide en segundos. Su inverso es la frecuencia " f ", ($T=1/f$) que es, por tanto, el número de veces por segundo que el campo presenta el mismo valor o el número de ciclos por segundo. Se mide en hercios (Hz). 1 hercio equivale a un ciclo por segundo
- ω : frecuencia angular. Su relación con la frecuencia es $\omega=2\pi f$.
- λ : longitud de onda. Es la distancia que viaja la onda durante un período. Se mide en metros y su relación con la frecuencia es $\lambda=v/f$, donde " v " es la velocidad de la luz en el medio (en el vacío o aire es " c ")
- k : constante de propagación. Da idea de cómo varía la fase de la onda en el espacio. Su relación con la longitud de onda es $k=2\pi/\lambda$.



Hay que notar que la mayoría de estos parámetros están relacionados entre sí. Los más característicos son la longitud de onda λ y la frecuencia f , que son inversamente proporcionales entre sí. A mayor frecuencia de una onda menor será la longitud de onda. También es importante decir, que la longitud de onda depende del tipo de medio por el que se propague una onda. Así, la longitud de onda de una onda que se propague por el vacío a una frecuencia dada es siempre mayor que si se propaga por un medio material como por ejemplo un plástico, el agua de mar etc.

La característica esencial de una onda electromagnética en general es que transporta energía a medida que se va propagando por el espacio. La potencia que transporta una onda se obtiene a partir del denominado *vector de Poynting* " S ", definido como (para el caso de la onda plana anterior)

$$\vec{S}(z,t) = \vec{E}(z,t) \times \vec{H}(z,t)$$

Sus unidades son vatios/m², es decir, el vector de Poynting nos proporciona la potencia que por unidad de área transporta una onda en cada instante de tiempo (se le llama densidad de potencia instantánea). Como es un vector, tiene una dirección y un sentido que es precisamente la dirección y sentido en que se propaga la energía. Es muy habitual, definir el valor de la densidad de potencia no en cada instante de tiempo sino establecer una media de sus valores durante un período. Al resultado de esa operación se le llama *densidad de potencia media* (o simplemente densidad de potencia). Para calcular la potencia total (instantánea o media) que atraviesa una superficie dada habría que hacer una operación complicada que es una integración del vector de Poynting extendida al tamaño de esa superficie⁷, de forma que se tuvieran en cuenta sus variaciones a lo largo de la superficie. En un caso más simple, pero que es bastante general, podemos considerar que la potencia que atraviesa una superficie, colocada perpendicularmente a la dirección de propagación, es el producto de su área por la densidad de potencia.

La naturaleza ondulatoria de las ondas electromagnéticas no es su única propiedad; varios efectos asociados con la emisión y la absorción de energía electromagnética revelan unos aspectos corpusculares, según el cual la energía transportada por una onda electromagnética está empaquetada en paquetes discretos llamados *fotones* o *cuantos*. Esta dicotomía en el comportamiento de una onda electromagnética, por la que unas veces se comporta como onda y otras como corpúsculos, y que llamamos dualidad onda-corpúsculo, ha sido explicada por la teoría electrodinámica cuántica. En este sentido, Albert Einstein supuso que la energía de un fotón individual era proporcional a la frecuencia a través de una constante de proporcionalidad "h" que se llama constante de Planck, es decir

$$W = hf \quad ; \quad \text{donde } h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ Julios } \times \text{ seg}$$

Como antes se ha comentado, cuando se desprende un electrón de un átomo decimos que se ha producido ionización. Esto puede conseguirse iluminando un átomo con un haz de energía electromagnética de frecuencia "f". Si un fotón choca contra un átomo puede transferir parte o toda de su energía a un electrón en forma de energía cinética. Si ésta es suficiente como para que el electrón abandone su órbita y se desprenda del átomo, se forman dos partículas cargadas: una el propio electrón libre y otra el átomo, con carga positiva, ya que le falta un electrón. Para que se

⁷ Integrar el vector de Poynting a una superficie significa, explicado de forma no muy rigurosa, dividir la superficie en superficies muy pequeñas, de forma que el vector de Poynting lo podamos considerar constante sobre cada una de ellas, multiplicar escalarmente el vector de Poynting por un vector perpendicular a cada pequeña superficie cuyo módulo es el área de esa pequeña superficie y sumar todos esos productos. El resultado de esa operación da el flujo del vector través de la superficie, es decir, la "cantidad" de ese vector que pasa por la superficie.

produzca ionización es necesario que la energía cinética que alcance el electrón sea superior a la energía de enlace que mantiene unidos al electrón con el átomo. La producción de iones en seres vivos puede alterar los procesos a nivel celular que se basan en el transporte de iones. La energía de enlace puede variar en un amplio abanico de valores. Podemos considerar que 4eV es el menor. En ese caso, aplicando la anterior fórmula, podríamos obtener qué mínima frecuencia debe poseer el fotón para producir una energía mayor de 4eV, esto es

$$f = \frac{W}{h} = \frac{6,4 \times 10^{-19}}{6,626 \times 10^{-34}} \approx 10^{15} \text{ Hz}$$

que es una frecuencia dentro del rango del ultravioleta. A la máxima frecuencia dentro del rango de las radiofrecuencias (300 GHz) la energía correspondiente a un fotón es de aproximadamente $1,25 \times 10^{-3}$ eV unos tres órdenes de magnitud inferior a la necesaria para la ionización. A la radiación correspondiente a frecuencias inferior a 10^{15} Hz se le llama radiación no ionizante y la a que posee frecuencias superiores a ese valor radiación ionizante.

PENETRACIÓN DEL CAMPO EN UN MEDIO MATERIAL

El campo electromagnético de radiofrecuencia penetra en los materiales dependiendo básicamente del valor de su conductividad " σ ". Para la mayoría de las frecuencias en el rango de la RF, el cuerpo humano es un buen conductor, lo que se traduce, de forma simple, en que la conductividad " σ " es bastante mayor que la unidad⁸. Para ello, se define un término denominado "penetración por efecto piel" (denotado por δ_e) que se define como la distancia que recorre una onda por un medio con pérdidas hasta que decrece su amplitud en $1/e$ (e es la base de los logaritmos neperianos y vale $e=2,71$), lo que significa aproximadamente el 37% de reducción y que vale

$$\delta_e = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \sigma}} \text{ (metros)}$$

De esta expresión es claro que la extensión a la que penetra un campo disminuye con la conductividad y con la frecuencia.

⁸ En realidad, un medio es un buen conductor cuando la densidad de corriente de conducción, que es proporcional a la conductividad (medida en condiciones estáticas), es mucho mayor que la densidad de corriente de desplazamiento, que es proporcional al producto de la frecuencia angular por la parte imaginaria de la permitividad; es decir, cuando se cumple que $\sigma \gg \omega \epsilon''$. Por tanto, la consideración de un medio como buen conductor depende de la frecuencia.

A muy bajas frecuencias, en las que el campo eléctrico y el campo magnético existen por separado, el campo eléctrico prácticamente no penetra en el cuerpo y los efectos son debidos al campo magnético que no se apantalla. Para campos de radio-frecuencia, cuanto mayor sea la frecuencia menor será la penetración del campo electromagnético en el tejido y más concentrado en su superficie estará. En el límite de un conductor perfecto (conductividad infinita) el campo no penetra en absoluto en el medio y, por tanto, una capa infinitesimal de conductor perfecto apantallaría el campo. Obviamente, lo mismo puede conseguirse con una capa mas gruesa de un buen conductor (un metal).

En la siguiente tabla se muestran algunos valores de profundidad de penetración para diferentes frecuencias para un tejido muscular (los tejidos musculares tienen un alto contenido en agua).

<i>Frecuencia En MHz</i>	<i>Constante dieléctrica relativa</i>	<i>Conductividad (S/m)</i>	<i>Penetración en cm</i>
0,1	1850	0,56	213
1	411	0,59	70
10	131	0,68	13,2
100	79	0,81	7,7
1.000	60	1,33	3,4
10.000	42	13,3	0,27
100.000	8	60	0,03

Como se puede observar, la profundidad de penetración a bajas frecuencias es grande y decrece rápidamente hasta 1 mm o menos en el rango de las frecuencias milimétricas. Sin embargo, hay que aclarar que aunque a frecuencias bajas la profundidad de penetración es grande, la cantidad de energía que penetra en un cuerpo conductor del tamaño de un humano es pequeña debido al apantallamiento del campo eléctrico. A 60 Hz, por ejemplo, el campo eléctrico en el interior de un pequeño objeto esférico es casi 6 órdenes de magnitud más pequeño que el campo eléctrico externo. Sólo alrededor de la frecuencia de resonancia de un humano (en torno a 40-80 MHz), el campo interno es sólo un orden de magnitud inferior al externo.

Conociendo las propiedades eléctricas de un medio en todos sus puntos, es posible determinar el campo electromagnético en su interior. La razón con la que un cuerpo de masa "m" absorbe la energía electromagnética es el producto de la masa por el SAR (que posteriormente definiremos), que varía de un punto a otro del cuerpo ya que la conductividad es diferente para diferentes tipos de tejidos que

forman el cuerpo. Por el contrario, la densidad es similar para todo el cuerpo, exceptuando los huesos. A modo de ejemplo, a la frecuencia de 900 MHz (móviles GSM), la conductividad es de 1 S/m, la densidad de masa $0,001 \text{ Kg/m}^3$, un campo de 30 V/m produciría un SAR de 1 W/kg. En niños, el SAR producido por un campo en particular es ligeramente mayor pues contienen un mayor número de iones lo que incrementa su conductividad. Recordemos que estos valores son los correspondientes al interior del cuerpo. En el exterior el campo es al menos tres veces mayor.

TIPOS DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS RADIADAS

Dependiendo de las aplicaciones el campo electromagnético puede transmitirse en diferentes formas. Así en aplicaciones de calentamiento y efecto Doppler (aquel mediante el cual se detecta la velocidad de un móvil) se utiliza onda continua (CW: continuous wave) que es una onda en la que la frecuencia y la amplitud no varían con el tiempo. Sin embargo, para la mayoría de las aplicaciones en las que se transmite información entre dos puntos, la onda se modula en amplitud (AM), frecuencia (FM) u otros tipos que comentaremos más adelante. En aplicaciones de radar, se utilizan ondas pulsadas en las que además de la frecuencia (durante un pulso) están fijados los valores de la duración del pulso y su razón de repetición, que se mide en hercios.

Por otro lado, la propagación de una onda electromagnética, dependiendo de la aplicación, se realiza por diversos mecanismos; así tenemos

- Las emisoras de onda media (amplitud modulada AM) se propagan como ondas de superficie que siguen la curvatura de la Tierra. Por ello se ven muy influenciadas por los accidentes del terreno.
- Para señales de unos pocos KHz (ELF) o señales de altas frecuencias de radio (HF u onda corta), la propagación se hace por reflexión en la ionosfera, de forma similar a una línea de planos paralelos. Como ejemplo común está las emisiones de Radio Exterior de España. También se puede nombrar la utilización de satélites artificiales para reflejar ondas enviadas desde la Tierra
- En frecuencias entre 30 MHz y 30 GHz, la comunicación se establece de forma directa, es decir, en línea recta. La transmisión de frecuencias de televisión (VHF y UHF) y la telefonía celular se establece de forma directa, y por ello son necesarios los repetidores de señal para lograr alcances suficientes.

POLARIZACIÓN DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Puede ser un parámetro importante a tener en cuenta en los efectos biológicos. Así, se han publicado estudios sobre melatonina en ratas, que indican que ondas circularmente polarizadas producen efectos mientras que circularmente polarizadas no. La polarización de una onda es el lugar de los puntos del espacio que va recorriendo el extremo del vector campo eléctrico a medida que se va moviendo en el tiempo. Para interpretar de forma más simple la figura que el campo eléctrico va describiendo en el espacio al moverse, se realiza una proyección sobre un plano perpendicular a la dirección en que se propaga la energía. Sobre ese plano, existen tres tipos de figuras posibles que determinan el tipo de polarización posible de una onda; a saber

- Polarización lineal: el extremo del vector campo eléctrico se mueve a lo largo de una línea
- Polarización circular: el extremo del vector campo eléctrico se mueve a lo largo de una circunferencia girando, con el tiempo, en un sentido dado
- Polarización elíptica: es como la circular pero ahora el extremo del vector campo eléctrico describe una elipse.

La importancia de tratar la polarización de una onda reside en su influencia en la interacción del campo electromagnético con un medio material. Por ejemplo, no es igual que una onda que se propaga por el aire con el campo eléctrico dirigido según una dirección (pongamos la del eje X) choque contra un medio material muy largo en la dirección X que muy corto. En el primer caso, por ejemplo se podrá inducir una corriente de conducción que afectará mucho más que en el segundo.

REFLEXIÓN Y TRANSMISIÓN

Cuando una onda electromagnética propagándose por un medio transportando una potencia dada incide sobre otro parte de esa potencia es reflejada hacia el primer medio y parte es transmitida al segundo. Sobre la separación de los dos medios siempre se conserva la potencia, es decir, la potencia incidente más la reflejada será siempre igual a la transmitida. Siempre que se produzca un fenómeno de reflexión habrá menos densidad de potencia en el medio segundo que en el medio incidente. Sin embargo, ello no quiere decir que el campo eléctrico correspondiente a la onda transmitida sobre la superficie de separación sea menor que el incidente. De hecho, puede ser mayor.

La cantidad de potencia reflejada por un medio dado depende de diversos factores unos dependientes de las características de los materiales como la permitividad, la permeabilidad y la conductividad y otros del ángulo de incidencia de la onda. Entre los primeros es importante nombrar la conductividad. Si una onda

incide desde un medio en un medio con alta conductividad, es decir un buen conductor, prácticamente toda la energía volverá al medio incidente y prácticamente nada se transmite hacia el interior. Por lo tanto, un buen conductor es un medio que sirve para apantallar eléctricamente una región dada del campo electromagnético. Así, a ciertas frecuencias para las que el cuerpo humano se comporta como un buen conductor el campo eléctrico prácticamente no penetra en él. Es muy importante apuntar, sin embargo, que eso mismo no sucede con el campo magnético a bajas frecuencias ni en las cercanías de una antena, ya que penetra sin prácticamente restricciones en un conductor.

La cantidad de energía que penetra en un medio cuando sobre él incide una onda también depende de la inclinación con la que la onda choca contra el medio. Así, en general, si la incidencia es perpendicular se produce más penetración que si la incidencia es oblicua. Existen casos particulares en los que se produce reflexión total (ángulo crítico en el que se base por ejemplo la fibra óptica) y transmisión total (ángulo de Brewster) que no son relevantes ahora. Conociendo las características eléctricas de los medios es posible obtener el campo reflejado y el transmitido y por tanto la potencia reflejada y la transmitida.

Finalmente, se puede apuntar el fenómeno de reflexión en la Tierra, que se puede considerar como un buen conductor para la mayoría de las frecuencias. Por ejemplo, una antena de telefonía móvil situada a una distancia dada del suelo, radia un campo electromagnético a un punto dado del espacio que es suma vectorial del campo directo (aquel que se "ve" en línea recta) más el reflejado desde la Tierra.

RESONANCIA ELECTROMAGNÉTICA

Una propiedad importante en física es la de la resonancia de la que existen muchos ejemplos. El fenómeno de resonancia se produce en un sistema que puede oscilar a una frecuencia dada cuando interacciona con una excitación de frecuencia muy próxima a la anterior; ello da lugar a picos de amplitud en la oscilación. Así, podemos pensar en aumentar las oscilaciones de una persona en un columpio empujando a unos intervalos iguales al inverso de la frecuencia de oscilación natural del columpio; los ruidos vibratorios en un choque que sólo ocurren a ciertas velocidades concretas; el zumbido de los altavoces en ciertos sonidos o el circuito sintonizador de un receptor que responde fuertemente a frecuencias cercanas a las de resonancia, aprovechando esto para seleccionar las estaciones desadas y rechazar las demás. No vamos a describir el fenómeno de resonancia del campo electromagnético; nos centraremos sólo en sus efectos que pueden asimilarse a lo que sucede en un circuito eléctrico resonante compuesto por una resistencia, un condensador y una autoinducción conectadas en serie (circuito RLC). La importancia esencial de estos circuitos surge de la diferente forma en que responden a fuentes de diferentes frecuencias. Por ejemplo, en una radio, cuando sintonizamos una emisora estamos variando las características del circuito RLC para hacer coincidir

su frecuencia de resonancia con la frecuencia de la señal que queremos recoger y decimos que hemos sintonizado la señal. Para esa frecuencia dada, en el circuito RLC se producirá una corriente que será la mayor posible y podremos excitar el sistema receptor de sonido; por el contrario, si la frecuencia de la señal no es la frecuencia de resonancia del circuito RLC, la corriente producida será muy pequeña y no recibiremos prácticamente ninguna señal audible.



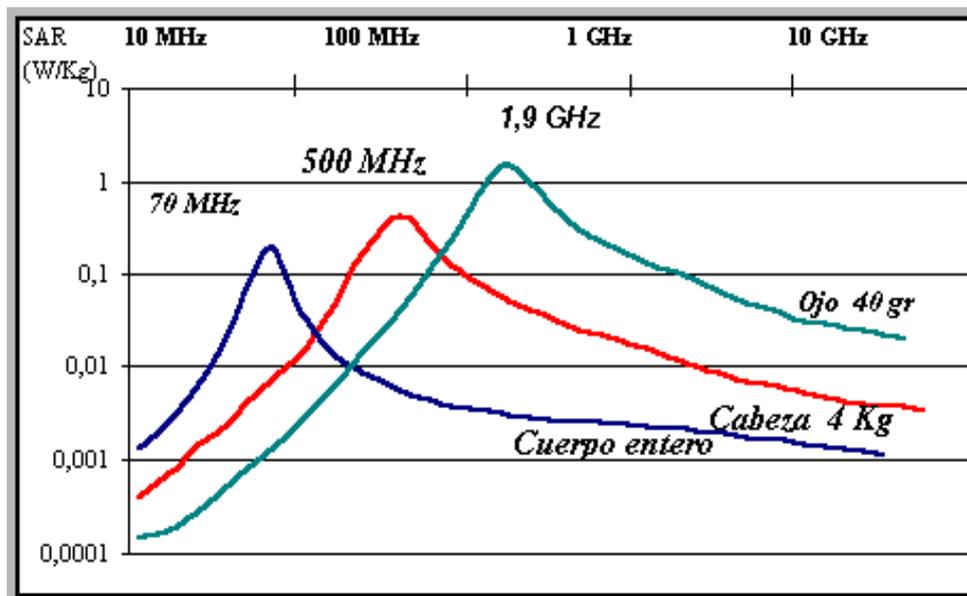
Podemos pensar en lo que ocurre cuando una onda electromagnética choca contra un objeto de unas dimensiones dadas. Ese objeto posee una frecuencia de resonancia, que depende de sus dimensiones y de sus características eléctricas, y reacciona de forma similar al circuito RLC cuando es atacado por una onda electromagnética. Si esa onda se propaga a una frecuencia bastante diferente de la de resonancia del objeto, reaccionará reflejando y transmitiendo una cierta potencia como ya se ha explicado. Pero si la frecuencia es próxima a la de resonancia se puede producir la mayor absorción de energía por ese objeto. Si el objeto es una parte de un ser humano (por ejemplo su cabeza) es posible que ondas electromagnéticas a ciertas frecuencias produzcan una mayor absorción que a otras frecuencias y por tanto, en principio, un efecto electromagnético (calentamiento u otros efectos bioelectromagnéticos) mayores. Desde el punto de vista electromagnético, cualquier objeto capaz de absorber potencia es una cavidad resonante, que se caracteriza, entre otros parámetros, por su frecuencia de resonancia. A dicha frecuencia se produce la mayor absorción de potencia de una onda electromagnética que incida sobre él. La frecuencia de resonancia de una cavidad depende del tipo de medio que la forme, de su forma y de sus dimensiones. Existen expresiones empíricas que dan de forma aproximada la frecuencia de resonancia. Así para cuerpos con una dimensión predominante L

$$F_r \approx 1,14 \times 10^8 \frac{1}{L} \text{ Hz, expresando "L" en metros}$$

y para cuerpos sin una dimensión predominante

$$F_r \approx 0,75 \times 10^8 \frac{1}{D} \text{ Hz, donde "D" es la máxima dimensión en metros}$$

De esta manera se puede tener una idea aproximada de la frecuencia de resonancia de las distintas partes del organismo. En la gráfica siguiente se muestra, en función de la frecuencia, la variación de la SAR para un cuerpo entero, la cabeza y el ojo.



Cuanto menor es el tamaño de la cavidad mayor es la frecuencia de resonancia y también mayor es la absorción de energía. Ello es debido a que la relación superficie/volumen en los cuerpos pequeños es superior a la de los de mayor tamaño, por lo que la potencia que entra en ellos debe distribuirse sobre un volumen porcentualmente menor, dando una mayor densidad de potencia absorbida y por tanto a un aumento del SAR. La frecuencia de resonancia para el cuerpo humano está en el entorno de los 70 MHz, lo que indica que a esas frecuencias se producirá la mayor absorción de potencia de una onda electromagnética.

La molécula de agua es, con mucho, la más presente en los organismos vivos. Se trata de una molécula con un fuerte momento dipolar lo que facilita su polarización ante la presencia de un campo eléctrico. Si la frecuencia de la radiación electromagnética es lo suficientemente elevada como para que el continuo movimiento oscilatorio en el medio viscoso a nivel molecular permita absorber energía más rápido que la que disipa el medio, se producirá un incremento de temperatura del agua. Existen frecuencias de resonancia para el agua en las que la absorción es máxima. Dichas frecuencias son 2.45 GHz, 22 GHz y 180 GHz. De esta manera se puede explicar el funcionamiento de un horno microondas: su frecuencia de excitación es de 2.45 GHz, de manera que se produce una absorción de energía en las moléculas de agua presente en los alimentos y ello genera un incremento de temperatura.

MODULACIÓN

Las ondas electromagnéticas radiadas por una antena se utilizan para transmitir información (voz, datos digitales, etc.) en una señal llamada señal en banda base. Los dispositivos electromagnéticos son del orden de la longitud de onda (o algo menores). Así, si se quiere transmitir voz, cuya frecuencia máxima ronda los 15 KHz, necesitaríamos grandes antenas. Por esta razón y algunas otras como la mejor distribución del espectro o las mejores características de propagación, es necesario realizar un proceso que se llama modulación, y que básicamente se trata de trasladar la señal en banda base a una frecuencia superior que "transporta" esa señal y que se llama señal portadora. La información se puede transmitir en forma analógica o digital. Por ejemplo, la señal eléctrica de un micrófono producida por la voz o la música es una señal analógica con frecuencias hasta 15 KHz, aproximadamente. Si esta señal es enviada por transmisión analógica, el tamaño o amplitud de la onda portadora de RF en cualquier instante se hace proporcional al tamaño de la señal eléctrica moduladora en ese instante. A este proceso se le llama modulación en amplitud, pero existen otras formas de modulación. La onda portadora varía mucho más rápido que la señal a modular, de forma que la modulación produce una relativamente lenta oscilación en la amplitud de la onda portadora. La información también se puede transmitir en forma digital. En este caso se utilizan un pequeño número de símbolos. El lenguaje impreso es un ejemplo de información digital puesto que sólo usa símbolos del alfabeto. El código Morse es otro ejemplo que sólo utiliza dos símbolos: el punto y la raya, y se le llama código binario. Las señales analógicas están descritas por un número, que en general no es un número entero; el primer paso es digitalizar ese número redondeándolo al entero más próximo. Por ejemplo, si la intensidad de la señal eléctrica de un micrófono en un instante dado es de $1792.54 \mu\text{V}$ ($1\mu=1.10^{-6}$) el número 1792.54 se redondea al número entero 1792. Esto se puede expresar en forma binaria representándolo por una serie de ceros y unos que se pueden transmitir digitalmente hasta un receptor que lo convierte en una señal de valor $1792 \mu\text{V}$. La transmisión digital ofrece muchas ventajas sobre la transmisión analógica. Es menos susceptible a distorsión por interferencia y ruido eléctrico y está reemplazando a la transmisión analógica en radio, televisión telefonía móvil etc.

Un ejemplo típico de transmisión digital modulada es la telefonía celular actual denominada GSM (acrónimo en inglés de *Global System for Mobile Communications*), que actualmente es un standard europeo de transmisión digital mediante modulación en fase. Dos ondas electromagnéticas pueden tener la misma frecuencia pero tener distinta fase. Esto significa que una onda está desplazada respecto de la otra; así por ejemplo, cuando una tiene su máximo valor positivo la otra su máximo valor negativo. Cuando una onda está modulada en fase, cada dígito que se transmite introduce un cambio de fase en la onda portadora de manera que el cambio de fase introducido por un uno es diferente del introducido por un cero. También es conveniente decir que para aumentar el número de usuarios que se pueden comunicar con una estación base se utiliza una técnica de comprensión de información que se traduce en una modulación de pulsos a 217 Hz y a 8,34 Hz. Esta

modulación es de hecho equivalente a una modulación en amplitud a varias frecuencias a la vez, múltiplos de la frecuencia fundamental y con potencias cada vez menores. Así la modulación de pulso a 217 Hz, produce una modulación en amplitud de un 23,4% a 217Hz, de un 21,6% a 434 Hz, de un 18,9% a 651 Hz etc.

CAMPO ELECTROMAGNÉTICO EN COMUNICACIONES SIN HILOS

Uno de los sistemas que más a calado en la sociedad es la telefonía móvil. Prácticamente todo el mundo dispone de un terminal móvil y en muy pocos lugares ya no existe cobertura para poderlos utilizar. Eso significa una gran cantidad de estaciones base con las que los terminales puedan conectarse para establecer la comunicación. Los primeros años de desarrollos de telefonía celular se basaron en el estándar analógico. En la actualidad, prácticamente todo se utiliza en transmisión digital denominada GSM, como se ha explicado anteriormente. Ya se ha explicado la modulación utilizada por el estándar GSM. Las frecuencias empleadas para GSM son de 900 MHz y 1800 MHz con unas potencias máximas de transmisión en los terminales de 2 y 1 watio, respectivamente. En realidad, debido a la compresión realizada las potencias medias son de 0,25 y 0,125 vatios. Por otro lado, los móviles envían siempre la menor potencia necesaria para el correcto establecimiento de la conexión y sólo durante el período durante el que la persona habla, y no cuando escucha o está el terminal en espera.

Desde hace unos años está funcionando una tercera generación de móviles conocida como UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) que utiliza las bandas de 1885-2010 MHz y 2110-2200 MHz. La demanda de usuarios para UMTS de voz, datos y servicios de Internet hace necesario el uso de macroceldas, microceldas y picoceldas en servicios especiales en edificios.

Los teléfonos inalámbricos se utilizan en cortos alcances en viviendas y oficinas entre la base y el terminal manual. Muchos de ellos son analógicos y ahora cada vez más se está pasando a tecnología digital y operan alrededor de 1850 MHz. La máxima potencia emitida es de 250 mvatios y el valor medio de 10 mvatios. También existen sistemas restringidos como el utilizado por organismos públicos conectados a una red de telefonía.

Los transmisores de radio y televisión utilizan potencias mucho mayores que las de las estaciones base de telefonía móvil pues están diseñadas para cubrir áreas mucho mayores. Por la misma razón, sus estaciones base están colocadas en mástiles altos situados en altos lejos de los centros de las ciudades. Otros transmisores de alta potencia son los utilizados para control de tráfico aéreo y control de radar, que utilizan modulación por pulsos. Otras comunicaciones con potencias similares a los de telefonía celular son los de localización y comunicación por la policía, servicios de

emergencia, administraciones locales, servicios de utilidad, personal de seguridad, radioaficionados y servicios de radio-taxi.

Finalmente, las personas pueden estar en el campo de acción de transmisores como alarmas inalámbricas, juguetes, alarmas de niños, micrófonos o protectores antirrobo. Otros dispositivos que no están diseñados específicamente para radiar potencia pero producen fugas son los amplificadores de radiofrecuencia (RF). Así se pueden nombrar los dispositivos de calentamiento de RF en industrias de plásticos, diatermia por microondas en psicoterapia

CAMPO ELECTROMAGNÉTICO EN LA MATERIA: Concepto de SAR

Cuando hablamos de efectos biológicos del campo electromagnético hay que referirse al concepto de SAR. Y para ello, es necesario referirse al campo electromagnético en presencia de medios materiales. Es conocido que un campo electromagnético en el espacio libre ve modificado su comportamiento en presencia de un medio material; pero también este medio puede verse modificado por la presencia de ese campo electromagnético. En general, podemos reconocer tres tipos de comportamiento de un medio frente a un campo: conductor, aislante o dieléctrico y magnético. Los dos primeros tipos no dejan de ser una visión diferente del mismo fenómeno que es la respuesta eléctrica. Ya hemos comentado lo que es un conductor y un dieléctrico. El primero deja moverse las cargas por él con libertad y el segundo no. Pero en realidad, no hay ningún conductor perfecto ni ningún aislante perfecto. Es decir, no hay ningún material que deje conducir las cargas con total libertad ni ningún aislante que no las deje moverse en absoluto. Así, un conductor puede considerarse un mal aislante y un aislante un mal conductor.

En un conductor, el campo eléctrico tiende a anularse en su interior. En el caso límite de un conductor perfecto, sería cero. El parámetro utilizado para caracterizar un conductor es la conductividad " σ ", que se mide en Siemens/metro (S/m), de forma que la densidad de corriente en el conductor es

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}$$

Por el contrario en un medio dieléctrico o aislante, el campo eléctrico aplicado no hace que se muevan las cargas, pero sí produce un ligero desplazamiento de las cargas de su posición de equilibrio, formando lo que llamamos dipolos eléctricos y se dice que se ha polarizado el material. Un dipolo eléctrico no es más que dos cargas una positiva y otra negativa separadas una cierta distancia y se caracteriza por su momento dipolar que es el producto del valor de la carga (positiva) por la distancia, pero con carácter vectorial. El material en total se caracteriza por su vector polarización \vec{P} , que no es más que una suma vectorial de los momentos dipolares de todas las moléculas promediada al volumen. Unos medios

dieléctricos son medios no polares (sus moléculas en ausencia de campo aplicado tienen un momento dipolar total nulo) y otros, como el agua, son medios polares pues las moléculas presentan un momento dipolar aún en ausencia de campo. Sin necesidad de entrar en más detalles, a partir de este modelo simple de la materia, es posible introducir el parámetro que caracteriza a un dieléctrico que es la permitividad o constante dieléctrica " ϵ ". Habitualmente, se emplea la constante dieléctrica relativa " ϵ_r ", que es el cociente entre la constante dieléctrica de un dieléctrico y la del vacío que se denota por " ϵ_0 ". Así, la constante dieléctrica del vacío (y prácticamente la del aire) es la unidad, que es además el menor valor que se puede encontrar. Cualquier otro medio dieléctrico presentará una constante dieléctrica relativa mayor que la unidad. Todos los medios reales presentan pérdidas, es decir, se producen corrientes por conducción que son proporcionales a la conductividad, como ya se ha explicado y que, por tanto, se calientan a través del efecto Joule. Desde el punto de vista de un dieléctrico, éste tendrá pérdidas (o sea no será perfecto) siempre que sea capaz de conducir "algo", lo que se modela a través de una conductividad " σ_d "; sin embargo, es más habitual caracterizar un dieléctrico real con pérdidas a través de una parte imaginaria de la constante dieléctrica " ϵ ", relacionada con la conductividad " σ_d " como

$$\sigma_d = \omega \epsilon'' \quad ; \quad \text{donde} \quad \epsilon'' = \epsilon_0 \epsilon_r \tan \delta$$

donde $\tan \delta$ se llama tangente de pérdidas. Así, en un caso general la constante dieléctrica es un número complejo dado por

$$\epsilon = \epsilon_0 (\epsilon_r' + j\epsilon_r'') = \epsilon_0 \epsilon_r' (1 + j \tan \delta)$$

Vemos que las pérdidas de un dieléctrico se caracterizan, indistintamente, por una parte imaginaria de la permitividad o por una conductividad, que depende de la frecuencia. Y aquí, es importante apuntar entonces, que las pérdidas de un medio biológico dependen de la frecuencia. Como las pérdidas producen, básicamente, calentamiento del medio debido al rozamiento en el movimiento de las moléculas, los efectos térmicos del campo electromagnético dependen de la frecuencia.

Respecto a los materiales magnéticos, pensemos que todos los electrones se están moviendo alrededor del núcleo por lo que serán sensibles a un campo magnético que les afecte. Unos medios se llaman diamagnéticos porque su reacción es oponerse al campo magnético y otros paramagnéticos porque favorecen el campo; la mayoría, sin embargo, es poco sensible al campo magnético. Existen otros tipos de materiales (el hierro por ejemplo) que muestran una fuerte respuesta magnética, de forma que cuando el campo magnético se retira todavía mantienen el suyo propio: son los medios ferromagnéticos. En este caso el material se dice que queda imanado. De forma similar a como se hace con los dieléctricos, el comportamiento magnético de un medio se describe a partir de la permeabilidad " μ " como

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

En la siguiente tabla vemos un resumen de los tres tipos de materiales que existen y el parámetro que lo caracteriza:

Tipo de medio	Parámetro característico
Conductor	Conductividad σ (S/m)
Dieléctrico o aislante	Permitividad ϵ_r
Magnéticos	Permeabilidad μ_r

La cantidad y distribución de la energía electromagnética absorbida por un tejido biológico expuesto a una campo de radiofrecuencia depende de los campos E y B internos. A medida que una onda electromagnética penetra en un objeto biológico, el campo electromagnético interactúa con los diferentes tejidos y sus superficies dando lugar a unos campos locales con una compleja distribución. Estos campos internos dependen de un conjunto de parámetros tales como: frecuencia, propiedades dieléctricas de los tejidos, geometría y orientación del objeto respecto a los vectores campo incidentes y, finalmente, de si la exposición es en campo cercano o lejano.

La distribución de energía resultante se puede describir en términos de un parámetro denominado "razón de absorción específica" (en inglés SAR) y que se define como la derivada temporal de un incremento de energía (dW) absorbida (o disipada) por un incremento de masa (dm) contenida en un elemento de volumen (dV) con una densidad de masa ρ ; es decir,

$$SAR = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{dm} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{\rho dV} \right) \quad W / Kg$$

La importancia del SAR reside en que proporciona la clave para determinar el efecto de una campo electromagnético sobre un tejido biológico. Lo anterior es su definición matemática. Desde un punto de vista más físico podemos decir que el SAR es la potencia disipada o absorbida por unidad de masa y se mide en watios/Kg. Si un tejido tiene una conductividad " σ " (en Siemens/m), la densidad de potencia disipada por unidad de volumen es $\sigma E^2 / 2$ (watios/m³). Por lo tanto

$$SAR = \frac{\sigma |E|^2}{2\rho} \quad W / Kg$$

siendo E el campo interno en Voltios/metro. El concepto de SAR sólo tiene significado en el rango de frecuencias entre 100 KHz y 10 GHz, aproximadamente,

es decir, en el rango en el que la penetración por efecto piel es del orden de 1 cm. A frecuencias por debajo de 100 KHz el parámetro importante es la densidad de corriente inducida; a frecuencias por encima de 10 GHz la energía es absorbida muy superficialmente y el parámetro importante es la densidad de potencia.

El SAR es un parámetro que no se puede medir directamente sino sólo estimar mediante técnicas numéricas aproximadas. Estimado el SAR de un medio, puede obtenerse el incremento de temperatura en un intervalo de tiempo Δt como

$$\Delta T = \frac{SAR \cdot \Delta t}{C_e}$$

donde C_e es el calor específico. Obviamente, esta expresión es simplemente orientativa y de escaso valor en el caso del cuerpo humano que tiene mecanismos de termorregulación ante subidas de temperatura.

MÉTODOS NUMÉRICOS PARA CÁLCULO DE SAR

El conocimiento del SAR y la distribución de temperaturas en el cuerpo humano en respuesta al campo electromagnético es de vital importancia para la evaluación de los efectos biológicos y las aplicaciones médicas del campo electromagnético. Ya que habitualmente tales características no pueden obtenerse experimentalmente, es necesario acudir a métodos numéricos que proporcionan una estimación teórica de esas magnitudes. Todos los métodos numéricos se basan en el modelado físico de las características electromagnéticas y geométricas de las distintas partes del cuerpo humano, o bien del cuerpo entero. Puede fácilmente comprenderse la dificultad de modelar de forma, no sólo exacta sino con la precisión necesaria, el cuerpo humano con sus múltiples variantes.

Existe una gran cantidad de literatura en el cálculo de la SAR para un cuerpo entero y en las distribuciones de SAR para diferentes modelos animales, incluyendo los humanos. En cualquier caso, el problema se reduce a resolver las ecuaciones de Maxwell, lo que no se puede hacer de forma exacta debido a las complicadas relaciones de contorno que cumplen los campos en interfases no planas y, por tanto, es necesario resolverlas de forma aproximada mediante métodos numéricos de diferentes tipos y que se aplican no sólo en electromagnetismo sino en todas las ramas de la física y de la ingeniería. Los primeros trabajos están basados en simples modelos esféricos o elipsoidales; los estudios más recientes utilizan modelos más exactos de los humanos a través de simulaciones numéricas mediante ordenador.

No es el objeto de estas notas, el relatar los métodos. Sólo nombraremos algunos de ellos y las categorías genéricas en que se suelen dividir. Podemos hacer dos grandes bloques. En el primero encuadraríamos aquellos métodos que resuelven

las ecuaciones de Maxwell en el dominio del tiempo. Entre ellos los más potentes son los métodos de diferencias finitas (FDTD Finite Difference Time Domain) y el método TLM (Transmission Line Method). Ambos métodos realizan una segmentación del cuerpo para atacar el problema en cada uno de los trozos en que queda dividido. En el segundo bloque encuadraríamos aquellos métodos que realizan una transformación previa de las ecuaciones de Maxwell mediante la transformada de Fourier y que se denominan métodos frecuenciales. Entre ellos hay métodos integrales y diferenciales, dependiendo de si atacan el problema punto a punto o de forma espacial global. Uno de los métodos frecuenciales más comúnmente utilizado es el Método de Momentos, que utiliza funciones conocidas (funciones base) para describir el funcionamiento de la función desconocida (variación del SAR por ejemplo).

Finalmente, también se utilizan métodos numéricos para evaluar las coberturas de las antenas y así conocer las operadoras dónde colocarlas para obtener el mejor funcionamiento. En este caso es muy común la utilización de método la teoría uniforme de la difracción (UTD).

Los resultados de esos estudios muestran que en las proximidades de la resonancia (aproximadamente 70-80 MHz, para un hombre estandar, aproximadamente la mitad si está frente a un plano conductor y alrededor de 100 MHz si permanece sentado) la SAR es mayor cuando el campo eléctrico incidente está alineado con el eje mayor del cuerpo. Para esta polarización, se observa una resonancia con factor de calidad Q bajo cuando el eje mayor del objeto es aproximadamente $0,9 \lambda$, donde λ es la longitud de onda.

La SAR en la resonancia es igual, aproximadamente, a $0,2 \text{ W/kg}$ por cada mW/cm^2 de densidad de potencia correspondiente a la onda incidente sobre el objeto. A frecuencias mayores la SAR puede llegar hasta casi un "cuasi-óptico" valor 5 a 6 veces menor que la anterior. A frecuencias muy bajas la SAR varía de acuerdo al cuadrado de la frecuencia. Como se ve en la figura 1 es mucho menos pronunciada para polarización H y K. En la resonancia, los animales pequeños absorben mucho más que los humanos; por ejemplo, para un ratón la SAR en la resonancia (aproximadamente 2 GHz) es de aproximadamente 1 W/kg por cada mW/cm^2 .

La SAR es un concepto clave en la planificación y análisis de experimentos, tanto in vitro como in vivo y sirve como base para los actuales standars de seguridad a la exposición humana correspondientes a las frecuencias de RF y microondas (RF/MW).

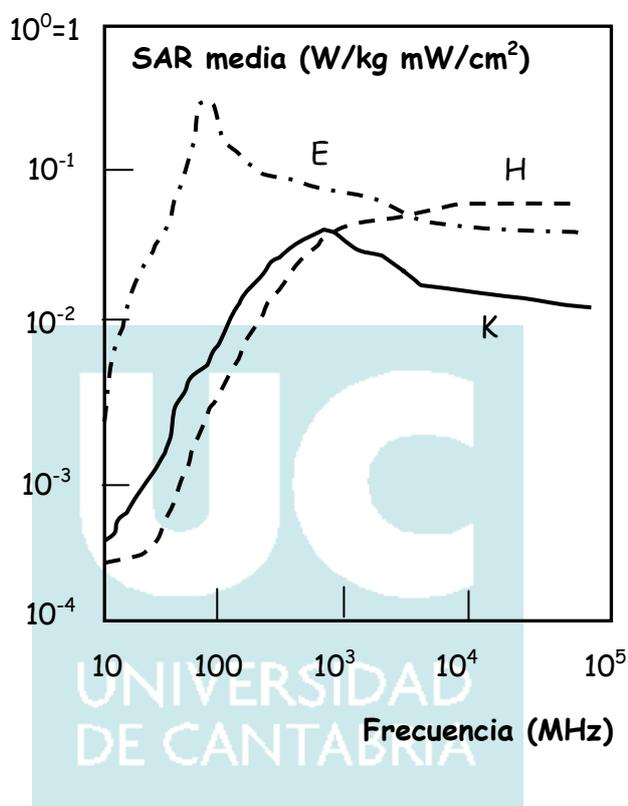


Figura 1.- Valores de SAR medio calculados para cuerpo entero en función de la frecuencia para modelos de hombre medio para las tres polarizaciones estandar. La potencia media incidente es de $1\text{mW}/\text{cm}^2$. Las polarizaciones E, H y K se refieren a la componente de la onda incidente que está alineada con el eje mayor del cuerpo, siendo K la correspondiente al vector de onda, es decir, la dirección de propagación.

REFERENCIAS

Existen multitud de referencias que se pueden consultar sobre bioelectromagnetismo. Habría que diferenciar entre aquellas que tratan solo sobre electromagnetismo puro, sin hacer referencias a la influencia de la radiación electromagnética en el medio ambiente, y aquellas en las que se trata el electromagnetismo a nivel muy básico como introducción al bioelectromagnetismo. También, añadiremos referencias puras de efectos biológicos sobre los tejidos y finalmente algunas direcciones de internet de donde, como es natural, se puede encontrar multitud de información, no toda ella de calidad.

Referencias electromagnéticas

- [1] J. E. Reiltz, F. J. Milford and R.W. Christy: "Fundamentos de la teoría electromagnética", cuarta edición, Addison-Wesley Iberoamérica, 1996.
- [2] C.R. Paul and S.A. Nasar: "Introduction to electromagnetic fields", second edition, McGraw Hill, 1987.
- [3] C.T.A. Johnk: "Teoría electromagnética: principios y aplicaciones", Ed. Limusa, 1992.
- [4] D.K. Cheng: "Field and Wave Electromagnetics", Addison Wesley, 1989.

Referencias bioelectromagnéticas

- [1] R.W.Y. Habash: "Electromagnetic fields and Radiation: human bioeffects and safety", Marcel Dekker, Inc., New York, 2002.
- [2] L.A. Sagan: "Electric and Magnetic Fields: Invisible risks?", Gordon and Breach Science Publishers, The Netherlands, 1999.
- [3] Eleanor R. Adair, Ronald C. Petersen: "Biological effects of radio-frequency microwave radiation", IEEE, Vol. MTT-50, No. 3, pp. 953-962, marzo 2002. Revista del 50 aniversario de IEEE.
- [4] A. Rosen, María A. Stuchly, André Vander Vorst: "Applications of RF/Microwaves in Medicine", IEEE, Vol. MTT-50, No. 3, pp. 963-974, marzo 2002. Revista del 50 aniversario de IEEE.
- [5] "Biological effects and medical applications of electromagnetic energy", OM P. Gandhi, Editor, Prentice Hall, 1990.

Referencias web

- [1] <http://www.bioelectromagnetics.org/>
Sociedad de bioelectromagnetismo
- [2] <http://www.mcw.edu/gcrc/cop.html>
Colegio Médico de Wisconsin
- [3] <http://www.grn.es/electropolucio/lafe3.htm>
Algunos informes sobre bioefectos
- [4] http://www.upv.es/antenas/Principal/efectos_biologicos.htm
Página con enlaces a informes
- [5] http://www.who.int/m/topicgroups/who_organization/en/index.html
Organización mundial de la salud
- [6] <http://atenea.ucauca.edu.co/~vflorez/links.html>

Enlaces a páginas web

- [7] <http://www-training.llnl.gov/wbt/hc/NonIonizing/NonIonizing.html>
Temas sobre electromagnetismo
- [8] <http://www.iegmp.org.uk/index.html>
Independent Expert Group on Mobile Phones
- [9] <http://www.who.int/peh-emf/>
- [10] <http://www.jcyl.es/jcyl/cf/dgtt/antenas/>
Informe de la Junta de Castilla y León
- [11] <http://www.ortho.lsumc.edu/Faculty/Marino/EL/ELTOC.html>
Libro Electromagnetismo y Vida
- [12] <http://www.donde.net/antenasymobil.htm>
- [13] <http://www.msc.es/salud/ambiental/ondas/camposelectromag.htm>
Enlaces a informes y a Real Decreto
- [14] http://www.sante.gouv.fr/htm/dossiers/telephon_mobil/intro.htm
Informe sobre telefonía móvil (en francés)
- [15] <http://www.niehs.nih.gov/emfrapid/>
Información del programa EMFRAPID.

APÉNDICE A

Con cantidades escalares se realizan las operaciones habituales de suma, resta, multiplicación y división. Con cantidades vectoriales se realizan dos operaciones esenciales:

- *Producto escalar:* consideremos dos cantidades vectoriales \vec{A} y \vec{B} (las flechas indican cantidades vectoriales en contraposición con letras análogas sin flecha que indican cantidades escalares). Se define el producto escalar de dos vectores como

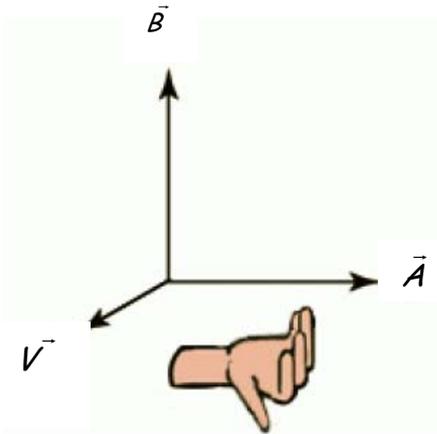
$$\text{Producto escalar: } E = \vec{A} \cdot \vec{B} = |\vec{A}| |\vec{B}| \cos \alpha$$

donde $|\vec{A}|, |\vec{B}|$ son los módulos (cantidades escalares) de los vectores correspondientes, que indican la magnitud del vector y α es el ángulo que forman los vectores \vec{A} y \vec{B} . La expresión "cos" se lee "coseno" y es una operación trigonométrica que produce un valor que varía entre 0 y 1 desde $\cos(0^\circ)=1$ hasta $\cos(90^\circ)=0$. Como se puede observar el producto escalar de dos vectores es un escalar. Si dos vectores son perpendiculares (entre ellos hay un ángulo de 90°) su producto escalar es nulo. El producto escalar es, con vectores, análogo al producto habitual con escalares ("números").

- *Producto vectorial:* para las mismas cantidades vectoriales anteriores, se define el producto vectorial como el vector dado por

$$\text{Producto vectorial: } \vec{V} = \vec{A} \times \vec{B} = |\vec{A}| |\vec{B}| \sin(\alpha) \vec{a}_v$$

donde las cantidades diferentes ahora son la función trigonométrica "sen" (que se lee "seno") y que varía entre 0 y 1 desde $\sin(0^\circ)=0$ hasta $\sin(90^\circ)=1$; \vec{a}_v es un vector unitario (de módulo la unidad) que indica la dirección del vector producto vectorial y que está dirigido en la dirección perpendicular a los dos vectores \vec{A} y \vec{B} y sentido según la regla de la mano derecha, que se indica en la figura siguiente



El producto vectorial de dos vectores es otro vector cuya dirección es perpendicular al plano que contiene la dirección de los dos vectores y cuyo sentido está dado por la regla de la mano derecha: en este caso "girando" el vector \vec{A} sobre el vector \vec{B} en el sentido indicado por la mano derecha del dibujo, el dedo pulgar indica el sentido del vector producto vectorial \vec{V}

Por otro lado el producto de un escalar por un vector es un vector con la misma dirección y sentido del vector pero con su módulo multiplicado por el escalar.

De la misma manera se pueden sumar o restar vectores de forma idéntica a como se hace con escalares pero sumando o restando sus módulos y sus fases (o argumentos). Lo que no se puede hacer es dividir cantidades vectoriales.

UNIVERSIDAD
DE CANTABRIA

APÉNDICE B

En este apéndice se indican las unidades de las diferentes cantidades electromagnéticas en el sistema internacional o MKS, que es el Standard en la comunidad científica. Otro sistema, llamado cegesimal (CGS), ha sido también muy utilizado especialmente en el rango de las frecuencias ópticas y también en algunas unidades magnéticas.

Cantidades y sus unidades			
<i>Cantidad</i>	<i>Símbolo Común</i>	<i>Nombre de la unidad</i>	<i>Símbolo unidad</i>
Densidad de corriente	J	Amperios por metro cuadrado	A/m ²
Constante dieléctrica	ϵ_r	Sin dimensiones	
Densidad de energía eléctrica	ω_E	Julios por metro cúbico	J/m ³
Campo eléctrico	E	Voltios por metro	V/m
Densidad de flujo eléctrico o vector desplazamiento	D	Culombios por metro cuadrado	C/m ²
Conductividad eléctrica	σ	Siemens por metro cuadrado	S/m ²
Energía	W	Julios	J
Frecuencia	F	Hercios (ciclos por segundo)	Hz
Densidad energía magnética	ω_M	Julios por metro cúbico	J/m ³
Campo magnético	H	Amperios por metro	A/m
Densidad de flujo magnético o inducción magnética	B ⁽⁹⁾	Tesla o Weber por metro cuadrado	T- Wb/m ²
Permeabilidad	μ	Henrios por metro	H/m
Permeabilidad	ϵ	Faradios por metro	F/m
Potencia	P	Vatios	W
Densidad de potencia	p	Vatios por metro cuadrado	W/m ²
Tensión o voltaje	V	Voltios	V
Corriente	I	Amperio	A

⁽⁹⁾ Las unidades magnéticas han sido tradicionalmente y en parte siguen siendo menos unívocas que las eléctricas. Así, es muy común encontrarse con las siguientes unidades para la inducción magnética B: Gauss (G), Oersted (Oe). Las conversiones son: $1G=10^4T$. $1 A/m=4\pi \times 10^3 Oe$; $1 \mu T=10 mG$ ($1\mu=10^{-6}$, $1m=10^{-3}$)

APÉNDICE C

En la siguiente tabla se muestran algunos de los prefijos, sus abreviaturas y su significado utilizados en las unidades.

<i>Prefijos y sus abreviaturas</i>		
<i>Prefijo</i>	<i>Abreviatura</i>	<i>Valor</i>
Pico	p	10^{-12}
Nano	n	10^{-9}
Micro	μ	10^{-6}
Mili	m	10^{-3}
Centi	c	10^{-2}
Kilo	K	10^3
Mega	M	10^6
Giga	G	10^9

UNIVERSIDAD
DE CANTABRIA