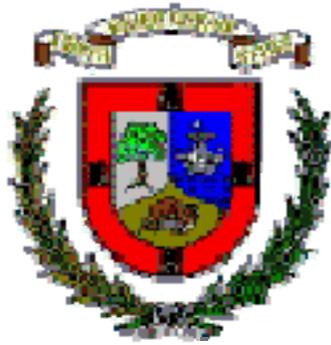


CONCEPTOS BÁSICOS DE CAMPOS
ELECTROMAGNÉTICOS DE

ALTA
FRECUENCIA



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
Grupo de Electromagnetismo

AUTORES:
Miguel Ángel Solano Vérez
Juan Sáiz Ipiña

INDICE

CAMPOS EN ALTA FRECUENCIA	3
Introducción.....	3
Inducción electromagnética	3
Campos variantes con el tiempo	5
Bajas y altas frecuencias	6
Energía de una onda electromagnética.....	8
Campo electromagnético en el espacio libre	9
Zonas próxima y lejana	10
Recepción y efectos de ondas electromagnéticas.....	12



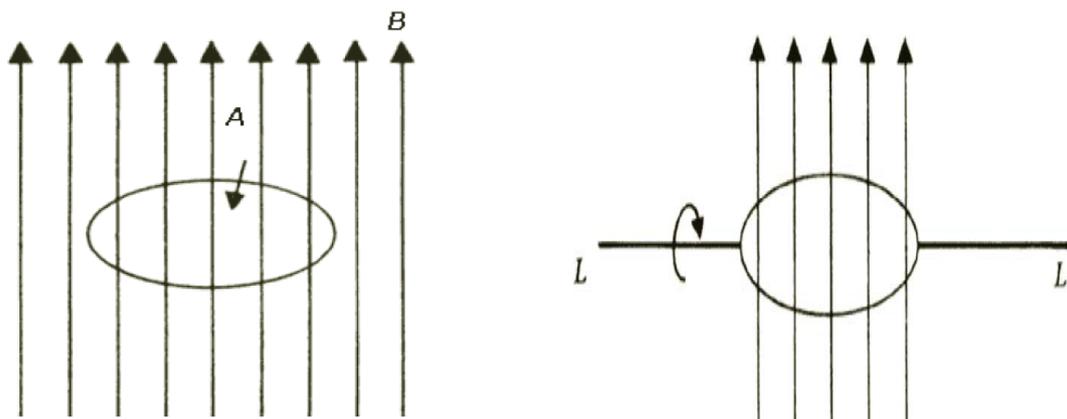
CAMPOS EN ALTA FRECUENCIA

Introducción

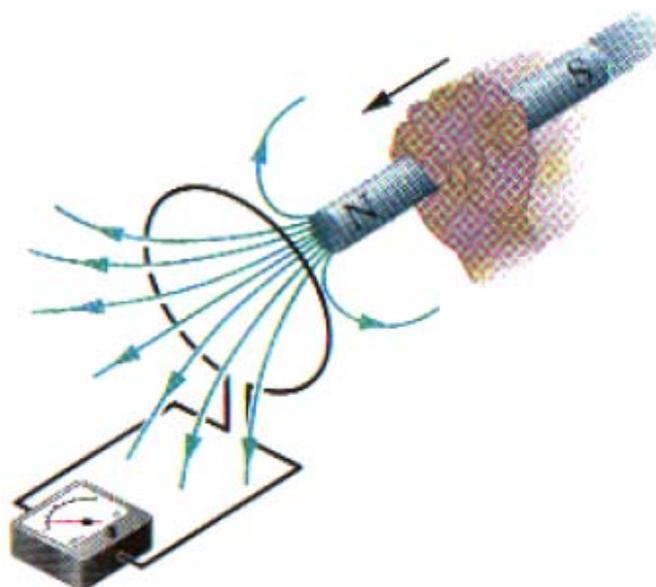
En la lección anterior hemos descrito de forma fenomenológica y descriptiva los campos electromagnéticos estáticos y de baja frecuencia (ELF) que podemos decir ocupan la parte del espectro electromagnético entre 0 y 3 KHz. Además hemos definido algunos conceptos esenciales como frecuencia y longitud de onda y diferencias entre los campos de ELF y HF o RF. En esta lección describiremos de forma sencilla algunas características de los campos de RF propias de estas frecuencias.

Inducción electromagnética

Como hemos adelantado cuando se estudian campos de muy baja frecuencia o, en el límite, campos estáticos, es decir, de frecuencia nula, el campo eléctrico y el magnético están desacoplados, de forma que uno no influye en el otro. Básicamente diríamos que entre ellos no hay ninguna relación y serían cantidades físicas independientes (como la masa y la velocidad, por ejemplo). En 1831, Michael Faraday encontró que un campo magnético podía producir una corriente en un circuito eléctrico cerrado cuando el flujo que atraviesa ese circuito variaba con el tiempo. Por flujo se entiende la cantidad de campo magnético que pasa por la superficie que encierra el circuito cerrado, tal y como indican las figuras.



Flujo magnético a través de una superficie *Se puede lograr que varíe el flujo haciendo rotar el circuito*



Al mover el imán en el sentido de la flecha varía el número de líneas de fuerza del campo magnético creado por el imán a través de la superficie imaginaria que encierra el circuito de corriente eléctrica. En el medidor podemos detectar que una corriente circula por el circuito, es decir, que se ha inducido una diferencia de potencial por lo tanto un campo eléctrico

La relación entre la diferencia de potencial, también llamada fuerza electromotriz, inducida en el circuito y el flujo de campo magnético es

$$V_{emf} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

donde

$$V_{emf} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (2)$$

$$\Phi = \iint_s \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (3)$$

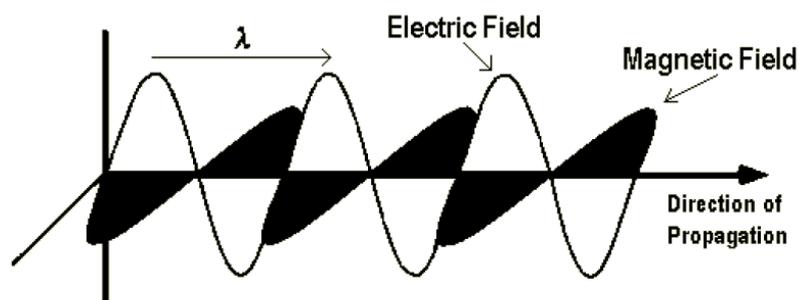
La ecuación (1) se lee así: la fuerza electromotriz inducida en el circuito es igual a la variación con el tiempo del flujo magnético a través de la superficie que encierra el circuito cambiada de signo. A esta expresión se le llama *ley de Lenz*.

La ecuación (2) indica que la fuerza electromotriz es la integral de línea a lo

largo del camino cerrado indicado por el circuito eléctrico y la ecuación (3) indica que el flujo magnético es la integral de superficie del campo magnético. Los significados matemáticos de estas ecuaciones no son importantes. Lo esencial de este asunto es que el campo eléctrico y el campo magnético están interrelacionados y se le llama *ley de inducción de Faraday*¹. Esta ley es la base para muchas aplicaciones de hoy en día como motores eléctricos, generados, transformadores, inductores de calor y otros dispositivos similares. Además, esta ley es una de las fundamentales del *Electromagnetismo*.

Campos variantes con el tiempo

Del apartado anterior obtenemos la conclusión de que un campo magnético variante con el tiempo produce un campo eléctrico variante con el tiempo. Supongamos que unas ciertas cargas variantes con el tiempo crean un campo eléctrico, que también puede ser creado (y a la vez) por la presencia de un campo magnético variante en el tiempo (ley de Faraday). Pues bien, existe otra ley, postulada por James Clerk Maxwell² y denominada ley de Ampère generalizada, que indica que un campo eléctrico variante con el tiempo produce un campo magnético también variante con el tiempo. Este a su vez, por la ley de Faraday, crea un campo magnético, que a su vez crea un campo eléctrico y así sucesivamente. La existencia de este fenómeno explica la propagación de una onda electromagnética por el vacío o por el aire, es decir, sin un soporte material. La principal consecuencia de la teoría desarrollada por Maxwell es la predicción de ondas electromagnéticas, de manera que una perturbación producida por un cuerpo cargado se propaga en forma de onda electromagnética. Esto se muestra en la figura siguiente



Onda electromagnética propagándose por un medio dado

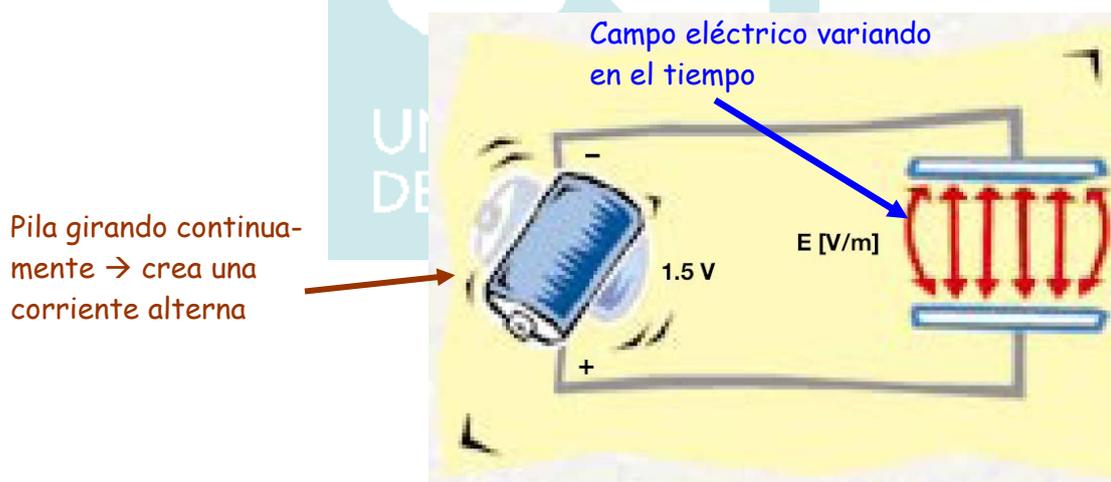
¹ Joseph Henry, independientemente de Faraday y casi al mismo tiempo, llegó a la misma ley descrita arriba. Por a veces extrañas cosas que tiene la historia, este efecto ha quedado para la posteridad como ley de Faraday.

² James Clerk Maxwell (1831-1879) es el "padre" del electromagnetismo a través de un conjunto de ecuaciones, publicadas en 1873, y que llevan su nombre. Con ellas se predice la propagación de una onda electromagnética por el vacío hecho comprobado experimentalmente por primera vez por el físico Heinrich Hertz en 1888.

Como se ha indicado en la lección anterior, los campos eléctrico y magnético de una onda electromagnética de RF están acoplados y en el límite de campos casi invariantes con el tiempo se vuelven independientes. En la práctica por encima de 20-30 KHz ($1K=10^3=1.000$) los campos eléctrico y magnético no se pueden separar y forman una onda electromagnética.

Ejemplo de creación de un campo variante en el tiempo

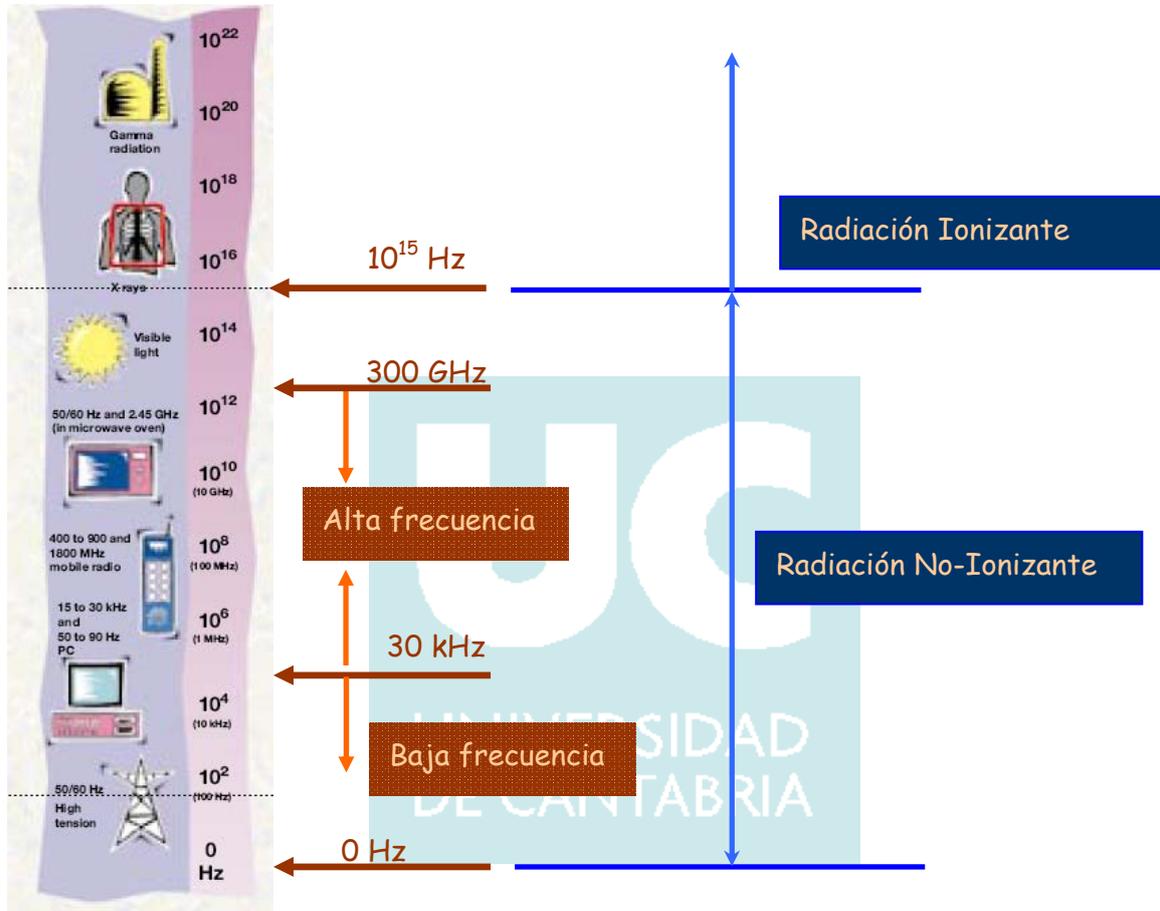
Siguiendo con el ejemplo de la lección anterior sobre creación de un campo eléctrico estático, en el que la pila creaba siempre una corriente en la misma dirección, supongamos ahora que la pila está rotando continuamente, de forma que crea una corriente que cambia continuamente de dirección. Ello se conoce con el nombre de corriente alterna y el número de veces que cambia su sentido en cada segundo se llama frecuencia que se mide en Hz. La frecuencia de la corriente urbana es de 50 Hz en Europa.



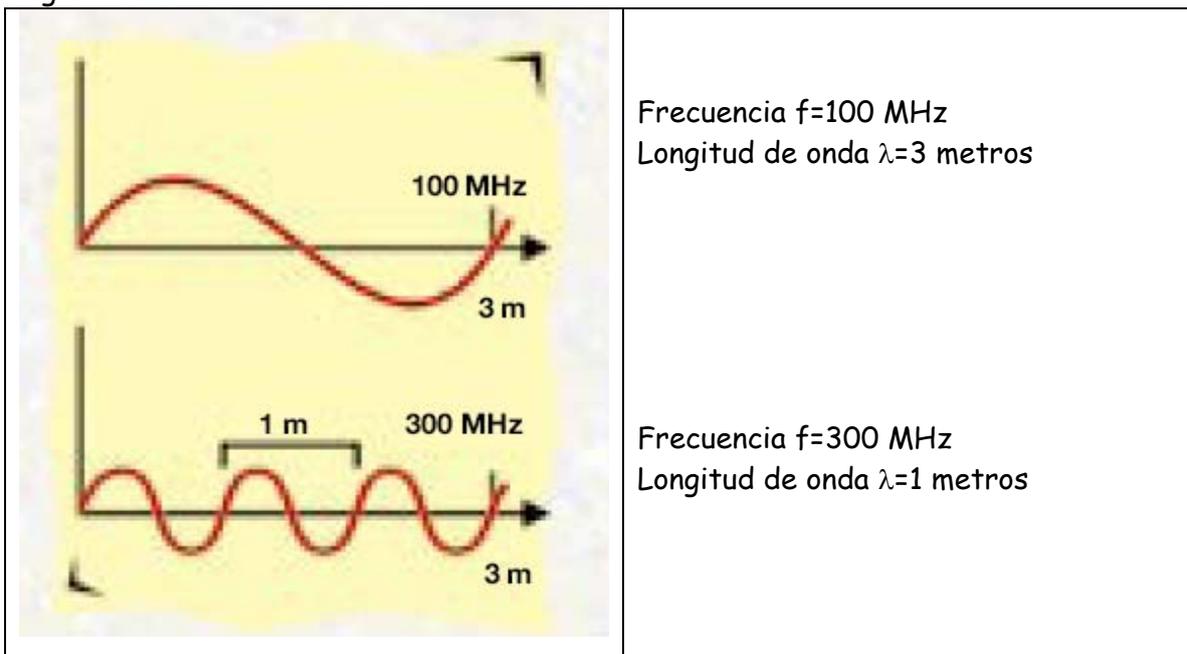
Bajas y altas frecuencias

Aunque este es un concepto ya descrito en la lección anterior, es importante incidir de nuevo en él. Es muy habitual dividir el espectro electromagnético en baja frecuencia (hasta aproximadamente 30 kHz) y alta frecuencia (de 30 kHz hasta 300 GHz)³. Por encima de esta frecuencia nos encontramos el infra-rojo, la luz visible, el ultra-violeta, y los rayos X y gamma en orden ascendente de frecuencias. De nuevo, en el siguiente esquema se muestra el espectro electromagnético, como una forma alternativa a la ya vista. Como novedad se muestra la zona del espectro correspondiente a la radiación ionizante y la no ionizante. Este concepto se explica en la siguiente lección.

³ Se recomienda visitar el documento *Conceptos básicos de bioelectromagnetismo*, en cuyo apéndice B se muestra una tabla con el significado y valor de los múltiplos que habitualmente se emplean en las unidades electromagnéticas.



Los conceptos de frecuencia y longitud de onda ya han sido definidos y caracterizan una onda electromagnética. Un ejemplo se muestra en la figura siguiente



Como ejemplos numéricos a una frecuencia de $f=3\text{kHz}$ la longitud de onda $\lambda=100\text{ km}$. A frecuencias de VHF (las de la televisión) las longitudes de onda están entre 10 y 1 metro. A una frecuencia de 300 GHz ($1\text{G}=10^9$) la longitud de onda es de 1 mm (una milésima de metro). Parece que esto algo tendrá que ver en los posibles efectos del campo electromagnético tanto en los equipos receptores preparados para recibir estos campos como en los seres vivos.

Energía de una onda electromagnética

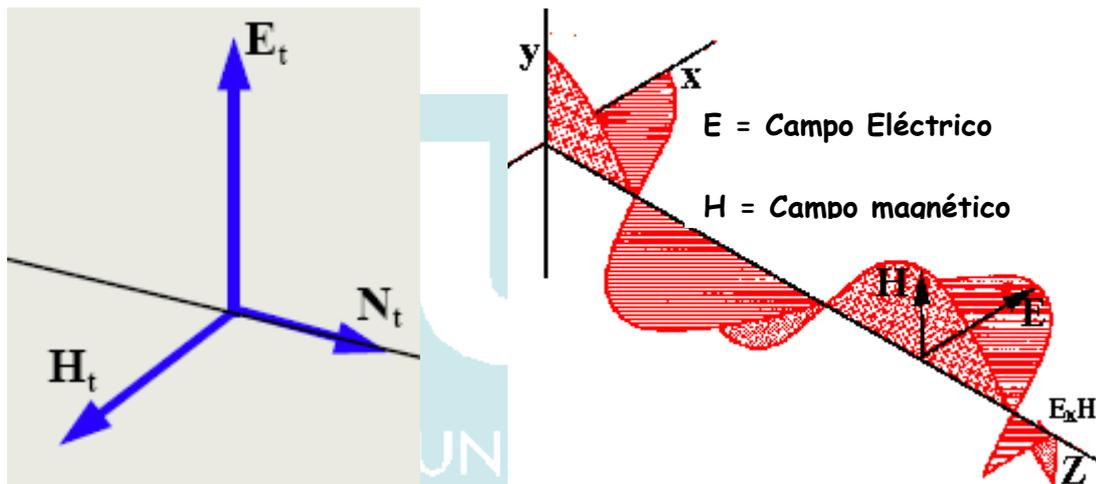
Lo esencial de una onda electromagnética de RF es que tiene asociada una energía que va propagándose por el espacio. La energía es la habilidad para producir trabajo y puede existir en diferentes formas: energía calorífica, química, cinética o electromagnética. La unidad de energía es el Julio -J- (en honor a Joule) que se define como la energía almacenada por una fuerza de un Newton -N- que actúa sobre una distancia de un metro -m-. La energía asociada a una onda electromagnética por cada unidad de tiempo se define como potencia y sus unidades son las de Vatio -V- (en honor a Watt).

La energía representa una manifestación física de la presencia de una onda electromagnética. Como una onda electromagnética está compuesta de campos eléctrico y magnético habrá un efecto sobre las partículas cargadas de los átomos, especialmente los electrones que forman la corteza de los átomos debido a su pequeña masa. Además, todas las partículas cargadas en movimiento generan un campo eléctrico y un campo magnético asociado con ellas. Entonces, los electrones absorben energía electromagnética de una onda que les llegue modificando su energía cinética, que es la que tiene que ver con su velocidad. Por lo tanto, la energía de un campo electromagnético influye en los medios sobre los que incide, aunque no sea ese en general su intención primordial.

Probablemente el uso más importante y extendido de la energía de RF es la de suministrar energía a los servicios públicos de telecomunicación. Por ejemplo, las emisoras de radio y televisión, la telefonía móvil, los servicios de comunicación personal, todas las comunicaciones inalámbricas civiles y militares, las comunicaciones vía satélite o los enlaces microondas punto a punto, entre otras aplicaciones, se sirven de la energía de RF. También existen otras aplicaciones que no son de comunicaciones como el calentamiento industrial por microondas análogo a los ya comunes hornos de microondas en nuestros hogares o aplicaciones médicas como la diatermia (calentamiento profundo de tejidos) en donde se aprovecha la habilidad de la energía de RF para calentar tejidos por debajo de la piel del cuerpo.

Campo electromagnético en el espacio libre

Las ondas electromagnéticas en el espacio libre son ondas que se denominan TEM (Transversales ElectroMagnéticas) u ondas planas. Estas ondas se caracterizan porque el campo eléctrico y el magnético vibran en un plano perpendicular a la dirección de propagación de la energía como muestra la figura siguiente.



Esquema de onda TEM Esquema en tres dimensiones de una onda TEM propagándose la energía en la z mostrando la variación del campo eléctrico y magnético dirección de N_t .

Las características esenciales de una onda TEM son:

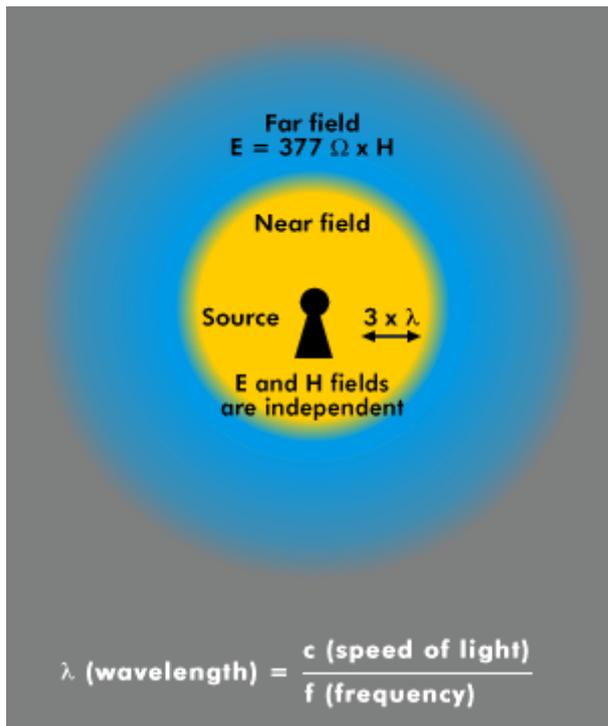
- El campo eléctrico y el campo magnético son perpendiculares entre sí y perpendiculares a la dirección de propagación marcada por N_t (figura de la izquierda o Z figura de la derecha).
- El cociente entre las amplitudes de ambos campos se llama impedancia intrínseca del vacío y vale 120π ohmios.
- Los campos eléctrico y magnético varían con el inverso de la distancia a la fuente que los crea.
- Los campos eléctrico y magnético forman una unidad común (campo electromagnético) que no puede separarse. La eliminación de uno de ellos implica la desaparición del otro; en consecuencia, lo correcto es hablar de campo electromagnético.
- La densidad de potencia (potencia por unidad de superficie) asociada a una onda TEM varía con el inverso del cuadrado de la distancia a la fuente.

Zonas próxima y lejana

Las ondas electromagnéticas son emitidas al espacio por las antenas. Una antena no es más que un dispositivo eléctrico que adapta un generador de energía electromagnético al espacio libre de la manera más eficiente posible. A frecuencias de RF la onda electromagnética producida por una antena transporta una energía a través del campo eléctrico y magnético que son inseparables y por ello se denomina campo electromagnético. Sin embargo, es importante distinguir entre dos zonas del espacio que rodea a un emisor de energía de RF:

- **Zona próxima o de inducción:** es la zona próxima a la antena y en ella el campo electromagnético no tiene características de onda TEM, ya que: existe componente del campo en la dirección de propagación, la relación entre campo eléctrico y magnético no es constante y no es la impedancia intrínseca del vacío o aire (o del medio por el que se propague) y la energía asociada a los campos en esta zona no se corresponde con energía propagándose por el medio si no más bien energía almacenada por el campo de forma similar a los campos estáticos o de baja frecuencia (ELF). En consecuencia, no hay prácticamente radiación de energía y los campos se llaman de inducción y a esta zona se le llama zona de inducción. Los campos en la zona de inducción disminuyen con, al menos, el cuadrado de la distancia o potencias superiores por lo que su efecto desaparece rápidamente al alejarse de la fuente. Además, los campos eléctrico y magnético en esta zona son independientes entre sí, pudiendo existir por separado.
- **Zona lejana o de radiación:** esta zona es una zona alejada de la antena y en ella los campos son básicamente una onda TEM con las características del campo indicadas en el apartado anterior. En esta zona los campos propagan o radian energía y por ello se llaman campos de radiación y a la zona se le llama zona de radiación.

Un esquema de esta separación se muestra en la figura



Near field: campo cercano

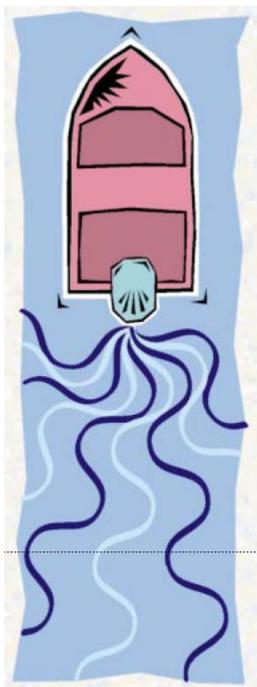
Far field: campo lejano (radiación)

La separación entre la zona próxima y la zona lejana no es una "línea" exacta. Los campos van transformándose gradualmente y no de forma abrupta. Podríamos decir que, de forma aproximada, cuando estemos examinando el campo electromagnético a una distancia mayor que 3 veces la longitud de onda λ de la señal emitida.

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

siendo "c" la velocidad de la luz en el aire (3×10^8 m/s) y "f" la frecuencia de la señal en Hz.

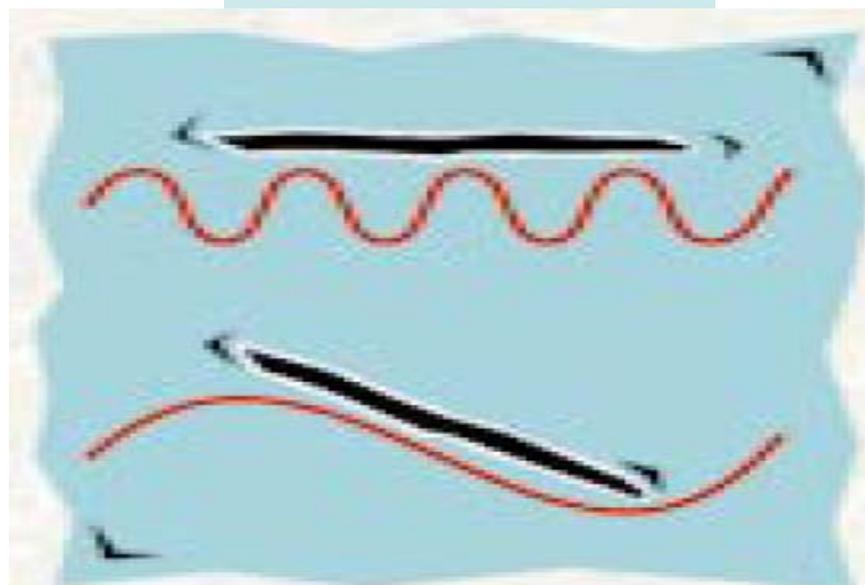
UNIVERSIDAD
DE CANTABRIA



Una forma intuitiva de entender el significado del campo próximo es pensar en un barco a motor haciendo las veces de una fuente de campo electromagnético. Al avanzar por el agua, la hélice de barco genera en sus proximidades unas ondas en el agua totalmente irregulares mezcla de muchas perturbaciones; esto es análogo al campo cercano. Pero a medida que observamos la perturbación en el agua cada vez más lejos del barco, las ondas se vuelven más uniformes y espaciadas de forma regular

Recepción y efectos de ondas electromagnéticas

Tanto las antenas como cualquier cuerpo al que le llegue una onda electromagnética podrá recibir parte de la energía electromagnética que transporta esa onda. Esto depende muy fuertemente de la frecuencia (o de la longitud de onda). Los tamaños de las antenas deben de ser, aproximadamente, del orden de la longitud de onda de la señal que pretenden recibir. Eso mismo es válido para los seres vivos: aceptan o absorben más y mejor aquellas onda electromagnéticas cuya longitud de onda sea, aproximadamente, del tamaño de la máxima dimensión del cuerpo. De forma intuitiva esto se explica con una tabla flotando sobre unas olas. Si la tabla es mucho mayor que la separación entre las crestas de las olas, prácticamente no las nota; pero si la tabla es del tamaño de esta separación, entonces se verá muy afectado por las olas y sufrirá un gran movimiento. A este fenómeno se le conoce con el nombre de resonancia y a la frecuencia de la onda electromagnética a la que el objeto absorbe más energía se le llama frecuencia de resonancia.



Esto es la razón por la que no todas las frecuencias afectan por igual a los seres vivos y los límites de exposición, como veremos en los módulos siguientes, no son constantes con la frecuencia.