

LECCION 9

TEORIA: LECCION N° 9

Las Ondas Electromagnéticas

En este mismo tomo estudiamos el comportamiento de los circuitos RC y RL, analizando de qué modo las variaciones de corriente y de tensión ocurren en función del tiempo. En los montajes prácticos, que acompañan el curso en la misma edición, vimos inclusive aplicaciones en temporizadores y osciladores de tales circuitos. Los osciladores, en especial, son importantes en la electrónica, pues pueden producir "ondas electromagnéticas", que, irradiadas por el espacio, recorren grandes distancias y así posibilitan la comunicación vía radio. En esta lección veremos qué son las ondas de radio u ondas electromagnéticas, y de qué modo se comportan, para que en las lecciones siguientes, al proseguir con el análisis de los circuitos, entendamos cómo se las puede producir.

Coordinación: Horacio D. Vallejo

Las ondas electromagnéticas fueron previstas antes de ser descubiertas. En verdad, las ecuaciones de Maxwell que describían los campos magnéticos preveían también la existencia de radiaciones, de la misma naturaleza que la luz, y que se propagaban en el espacio con una velocidad de 300.000 kilómetros por segundo.

Las ecuaciones de Maxwell fueron presentadas en 1865, pero solamente en 1887 Hertz consiguió comprobar la existencia de "ondas electromagnéticas" según las ya pre-

vistas y las produjo en su laboratorio.

En esta lección, no nos preocuparemos tanto del aspecto histórico del descubrimiento, como del estudio de su naturaleza, pero también añadiremos algunos datos importantes del pasado relacionados con la investigación y su utilización.

La naturaleza de las ondas electromagnéticas

En las lecciones anteriores distinguimos muy bien dos especies

de "influencias" de naturaleza eléctrica. Vimos que una carga eléctrica, o un cuerpo cargado, es responsable por una perturbación en el espacio que lo rodea y que denominamos "campo eléctrico", como muestra la figura 1.

Vimos que podríamos representar esta "influencia; por medio de líneas imaginarias, denominadas líneas de fuerza. (El uso de las líneas de fuerza fue propuesto por Faraday).

Las líneas de fuerza realmente no existen, pero pueden ayudar a

LAS ONDAS ELECTROMAGNETICAS

evaluar el comportamiento de la "influencia" de la carga en el espacio. La influencia es mayor en los puntos en que las líneas son más concentradas.

Del mismo modo, estudiamos otro tipo de influencia causado por cargas en movimiento, o sea, por las corrientes eléctricas, que difería mucho del campo eléctrico, y que fue denominado "**campo magnético**".

También representábamos el campo magnético por medio de líneas de fuerza pero de una forma bien diferente: las líneas eran concéntricas, envolviendo la trayectoria de las cargas (figura 2).

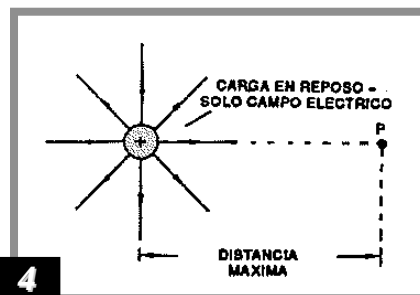
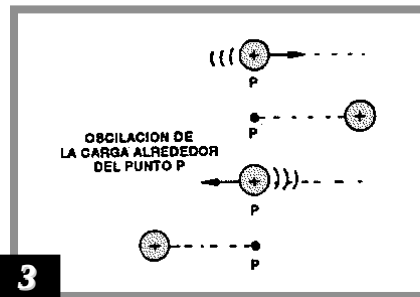
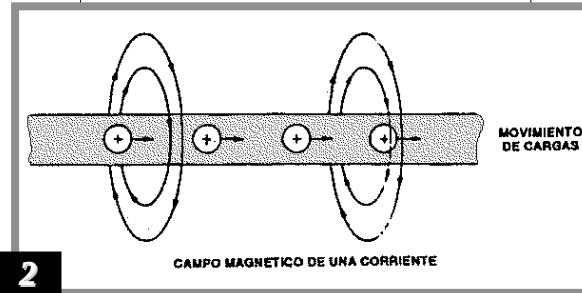
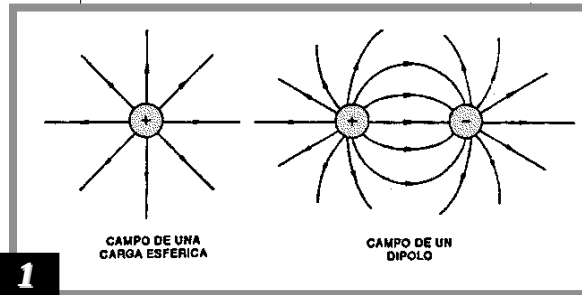
El tipo de influencia para los dos campos también se diferencia: el campo eléctrico actúa sobre cualquier cuerpo cargado, atraen o repelen conforme a la polaridad, mientras que el campo magnético actúa sobre determinados materiales, independientemente de su carga, atraen (materiales ferrosos) o repelen (materiales diamagnéticos).

¿Qué ocurriría con una carga eléctrica que, al mismo tiempo, pudiera producir un campo eléctrico y un campo magnético?

Para explicar este fenómeno importante, vamos a imaginar una carga eléctrica que pueda entrar en vibración alrededor de un punto, o sea que pueda "**oscilar**" como muestra la figura 3.

Partiendo entonces de una posición inicial en que la misma se encuentre detenida, sólo existe campo eléctrico a su alrededor, como muestra la figura 4.

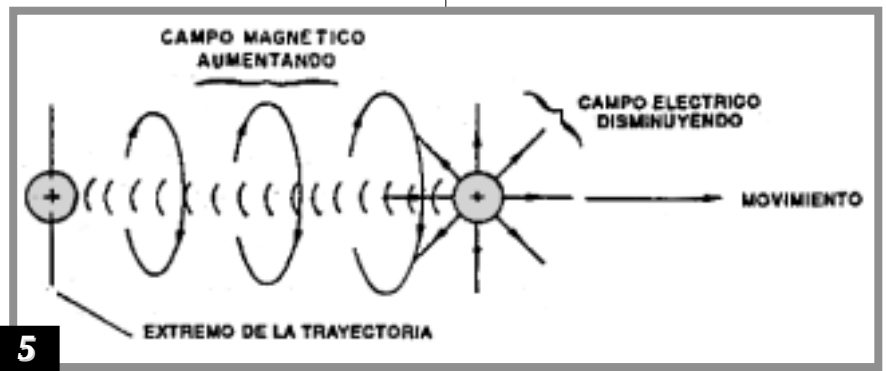
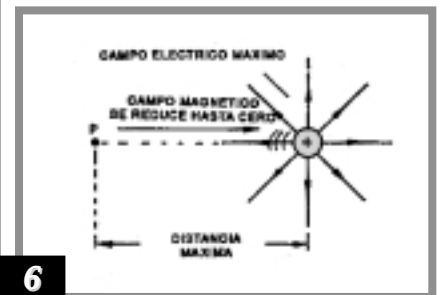
El campo magnético es nulo, pues la carga se encuentra en repo-



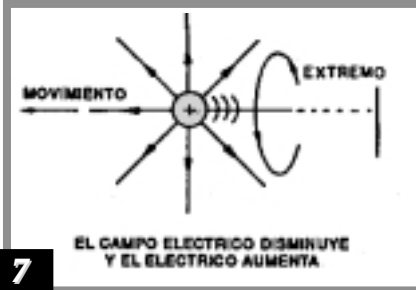
so. El campo eléctrico, a su vez, es máximo. A medida que la carga se desplaza hacia la posición central, el campo eléctrico se reduce, mientras que el campo magnético aumenta. En el medio de la trayectoria, cuando la velocidad es máxima, el campo magnético también es máximo, mientras que el campo eléctrico se reduce a cero (mínimo, figura 5). En dirección al otro extremo de la trayectoria, la velocidad se reduce gradualmente, con lo que se reduce también el campo magnético. El campo eléctrico vuelve a aumentar de intensidad (figura 6).

Cuando la carga llega al extremo de la trayectoria, por algunos instantes se detiene para invertir el movimiento. En este instante, el campo eléctrico nuevamente es máximo y el campo magnético se reduce a cero (figura 7).

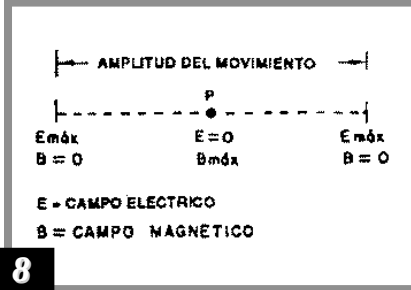
En la inversión del movimiento,



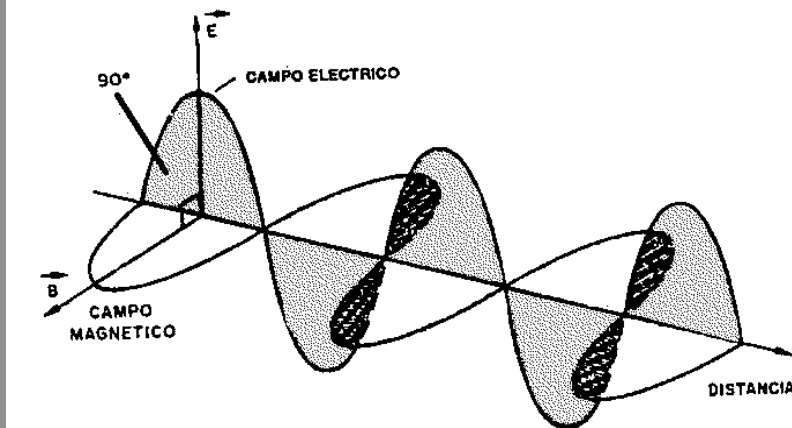
LAS ONDAS ELECTROMAGNETICAS



7



8



9

tenemos nuevamente el crecimiento de la intensidad del campo magnético hasta el medio de la trayectoria y la reducción al mínimo del campo eléctrico y después, hasta el extremo, el aumento del campo eléctrico y la disminución del campo magnético.

Vea entonces que, en esta "oscilación", el campo magnético y el eléctrico se alternan (figura 8).

Hay un desfase de 90 grados entre los dos campos.

El resultado de este fenómeno es la producción de una perturbación única que se propaga por el espacio con velocidad finita.

Vea que existe un tiempo determinado de contracción de las líneas de fuerza tanto del campo eléctrico como del magnético, así como para la expansión.

Así, independientemente de la

velocidad con que la carga oscile, o sea, de su frecuencia, la velocidad con que la perturbación se propaga es bien definida y constante.

Se puede demostrar que esta perturbación se propaga en el vacío a una velocidad de $2,997793 \times 10^{10}$ centímetros por segundo, o, redondeando hacia arriba, ¡300.000 kilómetros por segundo!

Esta perturbación da origen a lo que denominamos "**onda electromagnética**".

Recuerde:

La velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en el vacío es de 300.000 kilómetros por segundo.

En los medios materiales, como por ejemplo el vidrio o el agua, la velocidad quedará reducida por un

factor que depende de la naturaleza del material.

Podemos calcular esta velocidad por la fórmula:

$$C = \frac{C_0}{n} \quad (1)$$

Donde:

C es la velocidad de propagación de la onda en el vacío (300.000 km/s);

n es el índice de refracción del material;

C_0 es la velocidad de propagación en el medio considerado (km/s).

Vea que este resultado, 300.000 kilómetros por segundo, coincide con la velocidad de la luz en el vacío, ¡porque la luz es una especie de radiación electromagnética!

Polarización

Para representar una onda electromagnética precisamos tener en cuenta tanto su componente eléctrica como magnética, pues, como vimos, la misma corresponde a una "**alternancia**" entre los dos campos.

Para esta finalidad, hacemos uso de la representación mostrada en la figura 9.

El campo eléctrico varía según el eje E con semiciclos tanto positivos como negativos, mientras que el campo magnético varía según el eje H, también como semiciclos positivos y negativos.

Cuando deseamos recibir una onda electromagnética, lo que tenemos que hacer es interceptarla de modo de tener una corriente en un conductor que pueda ser amplifica-

LAS ONDAS ELECTROMAGNETICAS

da y trabajada por circuitos especiales.

Esto se hace, por ejemplo, mediante una antena que no es más que un alambre conductor colocado en el camino de la onda (figura 10).

Para que ocurra la inducción de una corriente en esta antena, la

misma debe ser colocada de determinada forma. Si los lectores observaran las antenas de televisión de su localidad, podrán tener una idea de la necesidad de esta colocación.

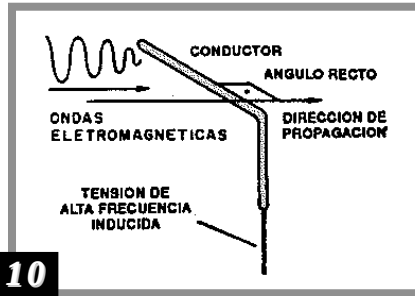
¿Por qué las antenas no se ponen en posición tal que las varillas estén en forma vertical como muestra la figura (B) 11, y sí como en (A) figura 11?

¡Esto ocurre porque la polarización de las ondas se hace horizontalmente, no verticalmente!

Frecuencia y longitud de onda

Para una corriente alterna, la frecuencia se define como el número de veces en que ocurre la inversión de su sentido de circulación. La frecuencia es numéricamente igual a este valor y es dada en hertz, cuya abreviatura es Hz.

En el caso de una onda electromagnética, su frecuencia es dada por el número de vibraciones por segundo de la carga (o cargas) que la producen, siendo numéricamente igual a este valor y también medida en hertz.



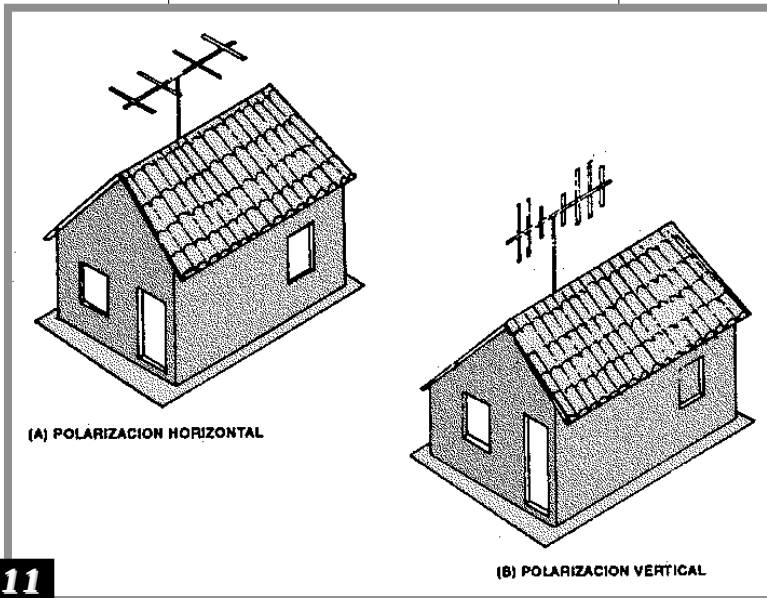
10

cuencia, podemos definir otra magnitud, que es la longitud de onda.

Tomemos como ejemplo una radiación electromagnética cuya frecuencia sea de 1MHz, o sea, 1.000.000Hz.

En un segundo, partiendo de la fuente emisora, o sea, las cargas que oscilan, las ondas recorren un espacio de 300.000 kilómetros, pues ésta es su velocidad, como muestra la figura 12.

Podemos percibir entonces que las ondas individualmente, o cada oscilación divide el "espacio" de 300.000 kilómetros o 300.000.000 metros. Cada onda, entonces, "se quedará" con un espacio de 300 metros, o sea, tendrá una "longitud" que equivale a 300



11

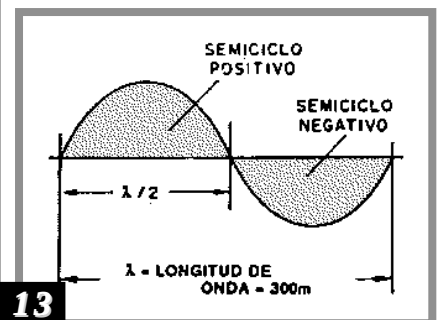
Si una onda electromagnética fuera producida por una carga que vibra a razón de 1.000.000 de veces por segundo, la frecuencia de esta radiación será de 1MHz.

El espectro electromagnético es el conjunto de frecuencias en que puede haber radiaciones electromagnéticas y es muy extenso, se analizará más adelante.

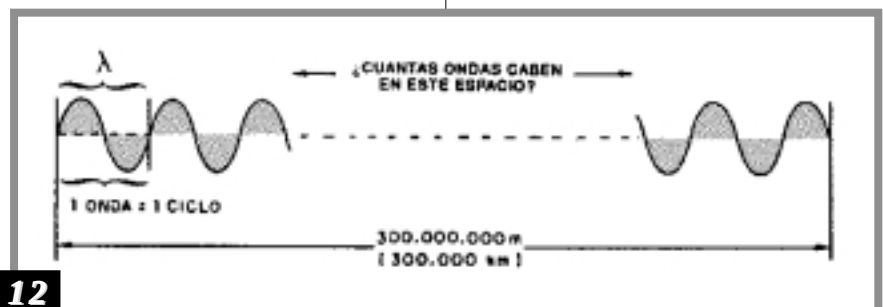
Para una determinada radiación electromagnética, además de la fre-

metros (figura 13).

Para las ondas electromagnéticas



13



12

es común expresar su naturaleza tanto por la frecuencia como por su longitud de onda. Hablar de una radiación de 1 MHz es, pues, lo mismo que hablar de una radiación de 300 metros.

Podemos fácilmente calcular la longitud de onda de cualquier radiación, conocida su frecuencia por la fórmula:

$$v = L \times f \quad (2)$$

Donde: v es la velocidad de propagación (300.000.000 m/s); L es la longitud de onda en metros; f es la frecuencia en Hertz.

Recuerde:

A cada frecuencia podemos asociar una longitud de onda para una onda electromagnética. La longitud de onda será tanto menor cuanto mayor fuera la frecuencia.

El espectro electromagnético y las ondas de radio

¿Cuáles son las frecuencias que dan origen a las ondas electromagnéticas?

¿Qué tipo de naturaleza tiene cada radiación en función de su frecuencia?

Si distribuimos las ondas electromagnéticas de acuerdo con su frecuencia o longitud de onda, veremos que, para cada sector de esta distribución, tendremos comportamientos diferentes. Las radiaciones de longitudes de ondas menores tienen comportamientos bien diferentes de las de mayores longitudes. Su propia utilización es distinta.

Llamamos espectro a la distribución de las diversas frecuencias de

radiaciones electromagnéticas, y en el caso es un espectro continuo, pues no existen saltos entre los valores que las mismas pueden asumir.

El espectro de las radiaciones electromagnéticas, en verdad, se extiende de 0 a infinito, ¡ya que se conocen fuentes que emiten "señales" de frecuencias tan elevadas como 10^{23} Hertz, o sea 1 seguido de 23 ceros!

Vamos al análisis del espectro:

Espectro electromagnético

Frecuencia: 0 a 20 kHz

Denominación: ondas eléctricas acústicas

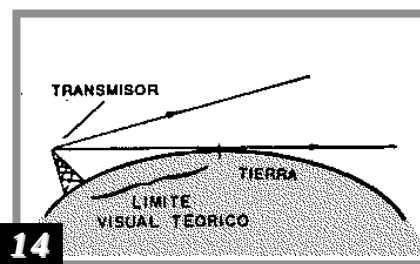
La longitud de onda varía entre el infinito y 15.000 metros. En verdad, estas ondas no tienen mucha "penetración" en el espacio, siendo usadas para la transmisión de energía por cable, o en la producción de sonidos.

Frecuencia: 20 kHz a 30 kHz

Denominación: VLF (Very Low Frequency = frecuencia muy baja)

Las ondas electromagnéticas de esta banda, de 15.000 a 10.000 metros, pueden ser usadas en los servicios de telecomunicaciones a larga distancia, pues siendo muy estables, no están influenciadas por la hora del día ni por las estaciones del año.

Vea el lector que el Sol es un



"enemigo" de las ondas electromagnéticas, pues la radiación que él emite también puede influenciar su propagación y dificultar el uso de determinados tipos de ondas de radio, como ésta, en mayor o menor intensidad.

Frecuencia: 30 kHz a 300 kHz

Denominación: LF (Low Frequency = baja frecuencia)

Pueden ser usadas en servicios de radiocomunicaciones de larga distancia, como por ejemplo en comunicación naval, o incluso para ayudar en navegación al orientar naves y aviones. Estas ondas ya son más afectadas en su propagación que las de la banda anterior, pues, según la hora del día y la estación del año, pueden ocurrir pequeñas atenuaciones.

Frecuencia: 300 kHz a 3.000 kHz

Denominación: MF (Medium Frequency = frecuencia media)

Las ondas de esta banda, que son ondas de radio, tienen longitudes entre 1.000 y 100 metros, pudiendo ser usadas en diversos tipos de servicios de comunicación, como por ejemplo, la propia radiodifusión (AM), comunicaciones entre aeronaves, barcos, policía, etc.

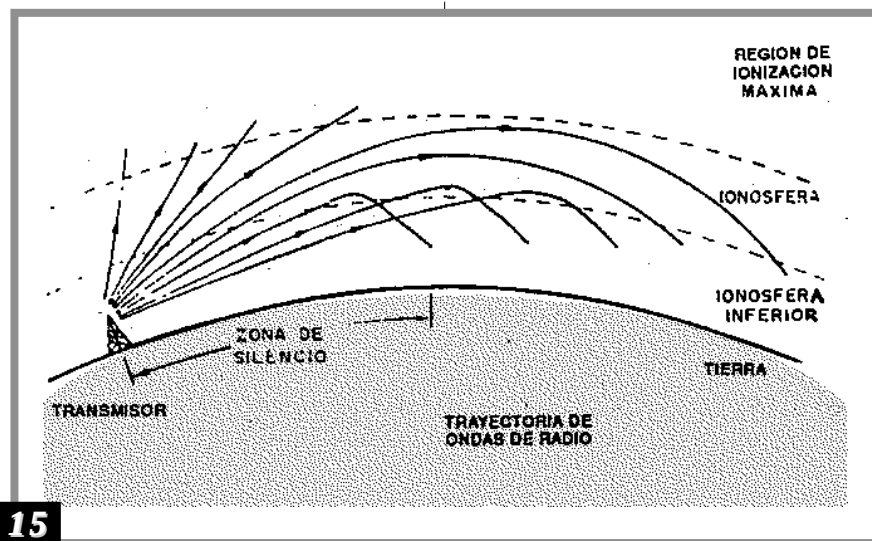
Estas radiaciones son influenciadas por la hora del día: su alcance es mayor durante la noche y menor durante el día. Igualmente, en invierno la atenuación es menor que en verano.

Frecuencia: 3.000 kHz a 30 MHz

Denominación: HF (High Frequency = alta frecuencia)

También tenemos aquí ondas de radio cuya longitud de onda estará entre 100 metros y 10 metros. Estas ondas pueden usarse en comunica-

LAS ONDAS ELECTROMAGNETICAS



15

ciones de larga distancia, en determinados horarios del día y en dependencia de las estaciones del año. Lo que ocurre es que estas ondas pueden ser reflejadas por las capas altas de la atmósfera (la ionosfera), así vencen el problema de la curvatura de la Tierra (figura 14).

Las ondas de esta banda son utilizadas por las estaciones de radio-difusión, radioaficionados, y servicios diversos de comunicación a distancias largas y medianas.

Frecuencia: 30 MHz a 300 MHz

Denominación: VHF (Very High Frequency = frecuencia muy alta)

Son también ondas de radio cuya longitud de onda estará entre 10 metros y 1 metro. Estas ondas se propagan en línea recta, como las demás, pero son influenciadas fuertemente por la presencia de obstáculos.

Así, no podemos usarlas en servicios que sobrepasen la línea visual o línea del horizonte (figura 15).

Las ondas de esta banda son usadas en servicios de radiodifusión (FM), televisión, comunicaciones a

distancias cortas y medianas como por ejemplo policía, aviación, etc.

Frecuencia: 300MHz a 3.000MHz

Denominación: UHF (Ultra High Frequency = frecuencia ultra alta)

Estas ondas de radio tienen longitudes de onda entre 1 metro y 10 centímetros. Son pues ondas muy cortas de comportamiento semejante al VHF, con la diferencia que son mucho más afectadas por obstáculos. Estas ondas son usadas en TV, radar, comunicaciones a distancia corta y mediana.

Frecuencia: 3.000MHz a

30.000MHz

Denominación: SHF (Super High Frequency = frecuencia super alta)

Estas ondas tienen longitud de onda entre la banda de 10 centímetros a 1 centímetro. Estamos en el dominio de las llamadas microondas, usadas en servicios de comunicaciones en línea visual, radar, etc.

Las mismas no pueden sobrepasar obstáculos, incluso de pequeño tamaño, son pues usadas en las comunicaciones visuales, o sea, en aquéllas en que el transmisor prácticamente "ve" el receptor.

Frecuencia: 30 GHz a 300 GHz

Denominación: Microondas

No hay realmente una sigla para las ondas de radio en esta banda. Su longitud está entre 1 mm y 10 mm y aquí el comportamiento de las radiaciones comienza a sufrir una transición. Podemos agrupar las radiaciones de esta banda en ondas centimétricas, milimétricas, e incluso submilimétricas. Su uso es el radar; las comunicaciones por microondas también son producidas por cuerpos calentados como las lámparas de vapor de mercurio. Se trata pues de radiación cuya naturaleza comienza a estar próxima a la de la luz.

Frecuencia: 300GHz (3 x 10¹¹) a 3 x 10¹⁴Hz

Denominación: Radiación infrarroja o simplemente infrarrojo.

Ya tenemos aquí un tipo de radiación de comportamiento bastante semejante al de la luz visible. La radiación infrarroja es producida por cuerpos calientes. Cuando acercamos la mano a un hierro caliente, "sentimos" esta radiación a la distancia en forma de calor. Las longitudes de onda son medidas en esta banda en micrones (μ), o millonésimas de metro, o bien en otra unidad que es el Angstrom (Å) que equivale a 10⁻⁸ metros o a la milonésima parte del milímetro.

Frecuencia: 3 x 10¹⁴ Hz.

Denominación: Luz visible

En este punto del espectro electromagnético tenemos una forma de radiación muy importante para nosotros que es la luz que podemos ver, o luz visible.

Su longitud de onda está entre 4.000 Angstroms y 7.000 Angstroms.

LAS ONDAS ELECTROMAGNETICAS

El color de la luz que percibimos está relacionada con su frecuencia, conforme a la siguiente tabla aproximada:

Violeta - 4.000 a 4.500 Angstrom
Azul - 4.500 a 5.000 Angstrom
Verde - 5.000 a 5.700 Angstrom
Amarillo - 5.700 a 5.900 Angstrom
Anaranjado - 5.900 a 6.100 Angstrom
Rojo - 6.100 a 7.000 Angstrom

La particularidad más importante de esta banda del espectro está, entonces, en el hecho de que poseemos "sensores" sensibles capaces de percibir las radiaciones, que son justamente nuestros ojos.

Frecuencia: 3×10^{14} a 3×10^{17}

Denominación: radiación ultravioleta o simplemente ultravioleta.

Tenemos aquí una penetrante forma de radiación electromagnética del tipo de la luz cuyas longitudes de onda están entre 4.000 Angstrom y 10^{-7} centímetros.

Este tipo de radiación es producida por la vibración molecular y atómica y encuentra aplicaciones industriales de diversos tipos.

Frecuencia: 3×10^{17} a 3×10^{20} Hz

Denominación: Rayos X

Tenemos aquí una forma muy penetrante de radiación electromagnética que puede, por su longitud de onda muy pequeña, penetrar en los cuerpos materiales de diversos tipos.

Esta forma de radiación es usada en medicina y en la industria de diversas formas.

Cuanto menor es la longitud de onda de los rayos X, mayor es su penetración.

Frecuencia: 3×10^{20} Hz a 3×10^{21} Hz

Denominación: Rayos Gamma

Esta forma peligrosa de radiación electromagnética es producida tanto por vibraciones atómicas y moleculares como también por las reacciones nucleares. Los rayos gamma tienen enorme penetración, por lo que pueden atravesar obstáculos de concreto o plomo de bastante espesor.

Frecuencia: 3×10^{21} Hz y más

Denominación: rayos cósmicos

Son partículas de increíble penetración producidas por reacciones nucleares o aceleración en campos magnéticos de partículas cargadas y pueden atravesar toda la masa de la Tierra como si no existiera. Estas partículas son detectadas con dificultad, y felizmente llegan en poca cantidad a nuestro planeta.

Recuerde:

* Las ondas de radio y las ondas de luz visible, infrarrojo y ultravioleta tienen la misma naturaleza.

* Las ondas de radio tienen frecuencias mucho más bajas que la luz visible y la radiación ultravioleta.

Para tener en cuenta:

"¿De qué modo se producen radiaciones como la luz visible o el infrarrojo por cuerpos calientes si en los mismos no hay electricidad en juego?"

En verdad, las cargas existen. Los electrones que giran alrededor de los átomos son cargas eléctricas y bajo ciertas condiciones especiales pueden realizar movimientos bruscos lo suficiente para generar

ondas electromagnéticas.

Así, si un átomo es excitado lo suficiente para que los electrones de una órbita a otra o incluso sean arrancados, este fenómeno puede ser acompañado de la emisión de una radiación electromagnética. Cuanto más energía esté involucrada en este proceso, mayor será la frecuencia de la radiación emitida.

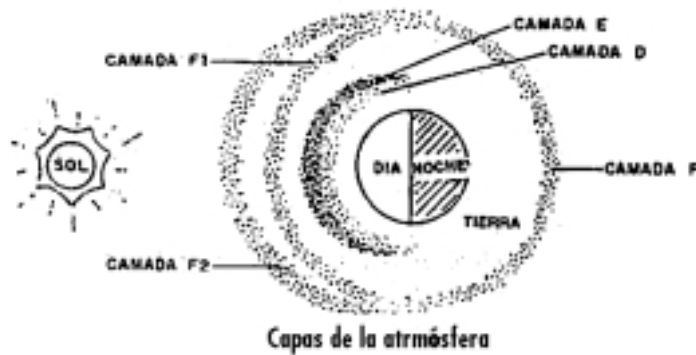
Así, si calentamos una barra de metal ligeramente, en el proceso, la energía involucrada será relativamente pequeña y lo que tendremos será la emisión de radiación de la banda del infrarrojo. Si el calentamiento fuera mayor, la energía será mayor y ya tendremos emisión en la banda de la luz visible. Las enormes energías que involucran las reacciones nucleares con movimientos de cargas con extremada violencia producen radiaciones en la banda de los rayos X, rayos gamma, etc.

"Explique mejor lo qué es la ionósfera".

Cuando Marconi realizó sus experiencias con la transmisión de señales de radio de Europa a los EE. UU., lo hizo contrariamente a la creencia de que esto no sería posible, pues las ondas no pueden acompañar la curvatura de la Tierra y mucho menos atravesar. Teóricamente, las comunicaciones por radio no eran interesantes pues estaban limitadas al alcance visual.

El éxito de la transmisión de Marconi condujo a diversas hipótesis sobre lo que estaría ocurriendo que permitía la propagación de las ondas a distancias tan grandes, acompañaban la curvatura de la Tierra. Hipótesis como la del paso de las ondas a una "tercera dimensión" o incluso ideas absurdas co-

LAS ONDAS ELECTROMAGNETICAS

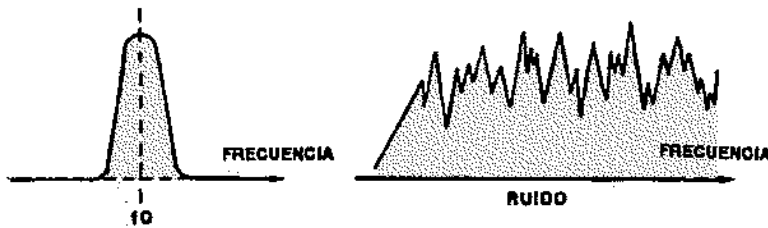


16

mo la "transparencia de la Tierra" aparecieron en esa época, pero la teoría que prevaleció fue la de Heaviside que propuso la existencia de una especie de "espejo" en las capas altas de la atmósfera, capaz de reflejar las ondas en trayectorias muy largas (figura 16).

Esta capa ionizada (dotada de electrones libres) se extiende desde una altura de 80 kilómetros a 400 kilómetros con una estratificación que depende de la hora, del día y de las estaciones del año.

La **ionósfera** es producida por el efecto de radiación solar que "arranca" electrones de las capas altas de la atmósfera, así las carga de electricidad. Solamente las ondas electromagnéticas entre aproximadamente 1 MHz y 50 MHz pueden reflejarse en estas capas altas. ☼



16