RADIACIÓN Y PROPAGACIÓN ELECTROMAGNÉTICA



Objetivo

Interpretar las ecuaciones de Maxwell y explicar, a partir de ellas, el carácter ondulatorio de los campos electromagnéticos variables en el tiempo.

Manual de clases

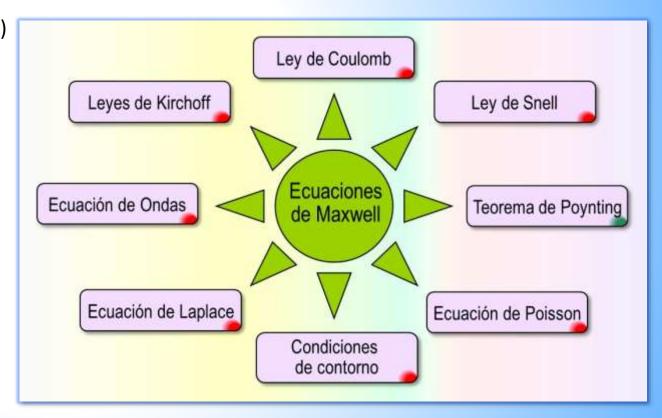
Última modificación: 21 de julio de 2022 Tema 1 de: COMUNICACIÓN POR RADIO Edison Coimbra G.

1.- LAS ECUACIONES DE MAXWELL

RADIACIÓN Y PROPAGACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Importancia de las ecuaciones de Maxwell

- La teoría electromagnética permite investigar de qué forma varían los campos eléctrico y magnético en el espacio y en el tiempo. Esta teoría está resumida de manera compacta en las ecuaciones de Maxwell.
- El físico escocés James C. Maxwell (U. de Cambridge, 1865) no descubrió estas ecuaciones, sino que las juntó. Son, en realidad, cuatro leyes generalizadas de Gauss, Ampere y Faraday sobre fenómenos eléctricos y magnéticos.
- Predicen la existencia de ondas electromagnéticas que se propagan en el espacio libre a la velocidad de la luz, predicción confirmada por Heinrich Hertz (Escuela Politécnica de Karlsruhe) quien las generó y detectó en 1887.
- A partir de las ecuaciones de Maxwell se determinan numerosas leyes y teoremas de importancia en Electrostática, Magnetostática, Electromagnetismo, Teoría de Circuitos y Óptica.



RADIACIÓN Y PROPAGACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Forma matemática de las ecuaciones de Maxwell



- Maxwell juntó las leyes de Gauss, Ampere y Faraday y les dio una forma matemática, relacionando los vectores de campo eléctrico y magnético con sus fuentes, que son las cargas en reposo, las corrientes y los campos variables.
- Se pueden escribir en forma integral y diferencial. Las ecuaciones integrales tienen integrales de línea, de superficie y de volumen. Las ecuaciones diferenciales, que involucran divergencia y rotacional, se aplican en un punto.

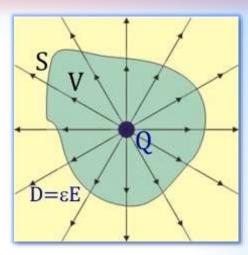
Ecuaciones de Maxwell					
Ley	Forma integral	Forma diferencial			
Gauss para campos eléctricos	$ \oint \mathbf{D} \bullet d\mathbf{S} = \int \rho d\mathbf{V} = \mathbf{Q} $	$\nabla \bullet \mathbf{D} = \rho$			
Gauss para campos magnéticos	$ \oint \mathbf{B} \bullet d\mathbf{S} = 0 $	$\nabla \bullet \mathbf{B} = 0$			
Ampere - Maxwell	$\oint \mathbf{H} \bullet d\mathbf{L} = \int \left(\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \bullet d\mathbf{S} = \mathbf{I}_{Total}$	$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$			
Faraday	$\oint \mathbf{E} \bullet d\mathbf{L} = -\int \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \bullet d\mathbf{S} = \mathbf{V}_{fem}$	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$			
	nagnética I: corriente eléctrica V: voltaje	I: corriente eléctrica			

RADIACIÓN Y PROPAGACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Ley de Gauss para campos eléctricos

(Kraus, 2000)

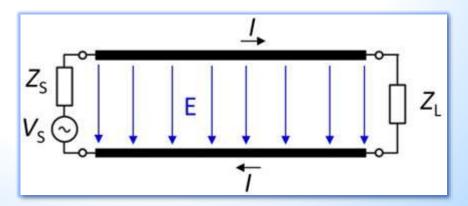
■ Enunciado. Establece que el flujo del campo eléctrico E que atraviesa una superficie cerrada S (por ejemplo una esfera), es proporcional a la carga eléctrica Q que hay en el interior del volumen V encerrado por la superficie.

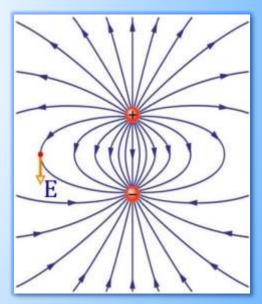




Interpretación

- Toda carga eléctrica "viene" con su propio campo eléctrico E. Por convención, el campo E se representa como vectores que salen de la carga positiva en todas direcciones, y van hacia ella si es negativa.
- **Existen monopolos** eléctricos y también dipolos eléctricos. Los monopolos pueden aislarse.
- En líneas de transmisión, el campo E sale del conductor superior que se carga positivamente durante el semiciclo positivo de la fuente, hacia el inferior negativo. En el semiciclo siguiente se invierte.





RADIACIÓN Y PROPAGACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

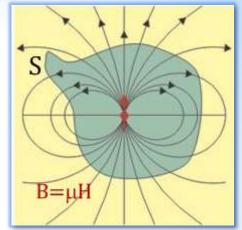
Ley de Gauss para campos magnéticos

(Kraus, 2000)

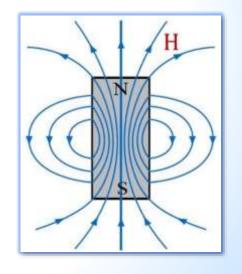
■ Enunciado. Establece que el flujo del campo magnético H que sale de una superficie cerrada S (por ejemplo una esfera) es igual al flujo que entra; por tanto, la carga magnética que hay en el interior de dicha superficie es nula, es decir que no existen cargas magnéticas.

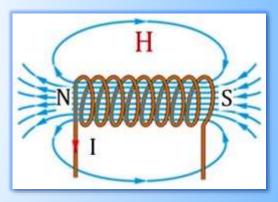


- Los campos magnéticos H, a diferencia de los eléctricos, no comienzan ni terminan en cargas diferentes. Las líneas de los campos H son cerradas y pasan por dos puntos diametralmente opuestos, los polos norte y sur. En los imanes naturales y en los electroimanes, las líneas de los campos H rodean al imán y salen del polo norte y entran por el sur.
- No existen monopolos magnéticos, sólo dipolos. Los polos magnéticos no puede aislarse; existen en pares.
- Como dato curioso; en el 2010 se anunció el descubrimiento de "monopolos magnéticos microscópicos" en estructuras glaciares, dando lugar a un flujo que se ha denominado magnetricidad.





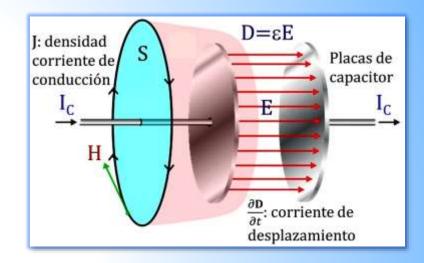




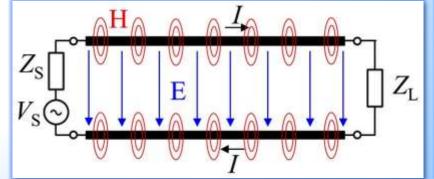
RADIACIÓN Y PROPAGACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Ley de Ampere - Maxwell

- Enunciado. Establece que un campo magnético H, vectorial de forma circular, es generado por la corriente eléctrica que fluye por la superficie S encerrada por dicho círculo.
- Interpretación. Un campo magnético H circular puede ser generado de dos maneras:
 - ①Por la corriente eléctrica I_c (corriente de conducción) que fluye por un alambre conductor, según lo establece la ley de Ampere original. La dirección del campo H se determina por la regla de la mano derecha, y la dirección en cada punto es la tangente a la línea.



- ②Por la variación temporal del campo E, según se establece con la corrección de Maxwell. Maxwell utilizó un capacitor para mostrar que un campo E variable en el tiempo genera un campo H circular a su alrededor, también variable en el tiempo.
 Esta variación se la conoce como corriente de desplazamiento.
- En líneas de transmisión, la corriente eléctrica / que fluye por los conductores produce un campo magnético H.



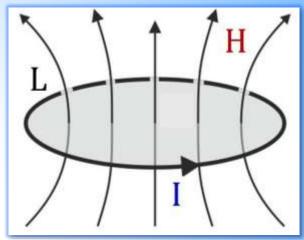


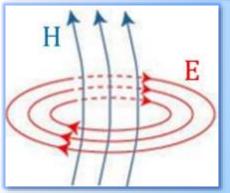
RADIACIÓN Y PROPAGACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Ley de Faraday

- Enunciado. Establece que un flujo de campo magnético H variable en el tiempo, que atraviesa la superficie encerrada por un círculo de perímetro L (una espira metálica o una simple curva imaginaria), induce una fuerza electromotriz fem capaz de producir una corriente eléctrica I variable que fluye por la espira.
 - Nota.- El sentido de la corriente inducida compensa la variación del flujo magnético.
- Interpretación.
 - La variación de un campo magnético H induce una fuerza eléctrica que mueve cargas en un circuito cerrado, es decir induce un campo eléctrico E. Este campo no es un campo electrostático causado por cargas eléctricas, no va de las cargas positivas a las negativas.
 - Se trata de un campo E que tiene líneas de campo cerradas alrededor del campo H. Un cambio en el campo magnético induce un campo eléctrico.





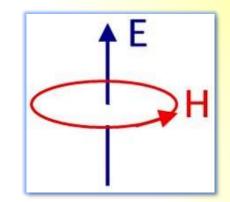


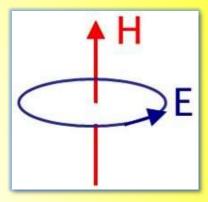
2. APORTE AL CONOCIMIENTO – ECUACIONES DE MAXWELL

RADIACIÓN Y PROPAGACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Son dos importantes aportes al conocimiento

- Aporte 1. Predijo la existencia del campo electromagnético.
 - De la hipótesis de la corriente de desplazamiento, Ley de Ampere-Maxwell, se desprende que un cambio en el campo E induce un campo H.
 - Además, se sabe de los trabajos de Faraday que un cambio en el campo H induce un campo E. De esta manera, los fenómenos eléctricos y magnéticos adquieren una simetría perfecta.





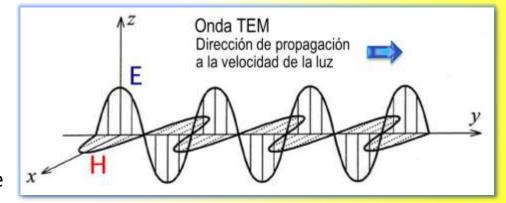
- Consecuencia 1. Si en alguna región del espacio existe un campo E que varíe con el tiempo, tiene que existir simultáneamente el otro campo, el H. Los dos campos deben existir al mismo tiempo, es decir, debe existir el campo electromagnético.
 - En el caso estacionario, que no depende del tiempo, puede existir un campo sin que exista el otro. Por ejemplo, el campo H producido por un imán es constante en el tiempo y no lleva un campo E.

Aporte al conocimiento – Ecuaciones de Maxwell

RADIACIÓN Y PROPAGACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Son dos importantes aportes al conocimiento (cont.)

- Aporte 2. Predijo la existencia de la onda electromagnética.
 - Maxwell encontró que cada uno de los dos campos debe satisfacer una ecuación que resultó tener la misma forma matemática que la ecuación de onda, la que describe la propagación de ondas mecánicas como la que se propaga en un cable, en un estanque, en el sonido, etc.
 - Esto significa que si en un instante el campo E tiene un valor determinado en un punto del espacio, en otro instante posterior, en otro punto del espacio, adquirirá el mismo valor. Lo mismo ocurre con el campo H.
- Consecuencia 2. Los campos E y H se propagan en el espacio, y como no pueden existir separadamente, el campo electromagnético es el que realmente se propaga, en forma de onda electromagnética, conocida como onda de radio.
 - Las ecuaciones predicen el valor de la velocidad con la que se propaga el campo electromagnético, que resulta ser igual a la velocidad de la luz. Este resultado se obtiene de una combinación de valores de cantidades de origen eléctrico y magnético.



- Existen razones para concluir que la luz, ya fuera de una vela, del sol o del foco, es una onda electromagnética que se propaga de acuerdo con las leyes del electromagnetismo.
- Con base en la teoría de Maxwell se iniciaron aplicaciones prácticas como las comunicaciones inalámbricas.

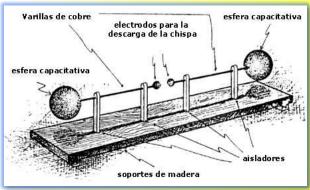
Aporte al conocimiento – Ecuaciones de Maxwell

RADIACIÓN Y PROPAGACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

La contribución de Hertz

- Hertz demostró la existencia de ondas electromagnéticas.
 - Heinrich Hertz, de la Escuela Politécnica de Karlsruhe, Alemania, se interesó en la teoría propuesta por Maxwell, la reformuló matemáticamente y logró que las ecuaciones fueran más sencillas y simétricas.
 - Desde 1884, Hertz realizó muchos experimentos sin éxito, hasta que en 1887 construyó en laboratorio un dispositivo radiador y otro detector de ondas electromagnéticas predichas por Maxwell. Era la primera comunicación por radio de la historia.
 - Gracias al experimento de Hertz se aceptó la teoría de Maxwell.
 - El ruso Alexander S. Popov continuó los experimentos de Hertz, y en 1897 inventó una antena que le permitió comunicarse con un barco a 5 kilómetros de la costa.
 - El mismo año de 1887, el italiano Guillermo Marconi perfeccionó el invento para lograr una comunicación a 20 kilómetros de distancia y comenzó a comercializarlo, dando origen a la industria de la comunicación por radio (comunicación inalámbrica).





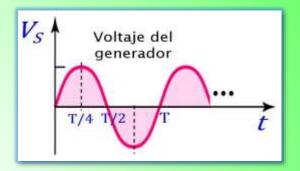
3. MECANISMOS DE RADIACIÓN Y PROPAGACIÓN DE ONDAS

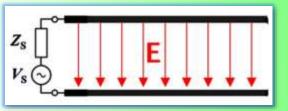
RADIACIÓN Y PROPAGACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

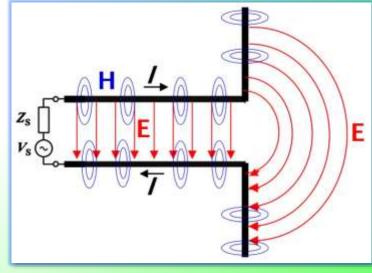
Campos electromagnéticos en lineas de transmisión

(Blake, 2004)

- Línea de transmisión abierta. Referencia: Ley de Gauss para campos eléctricos
 - Si se aplica un voltaje (Vs) a una línea de transmisión de 2 conductores, se genera un campo E entre ellos, ya que acumulan cargas opuestas.
 - Al estar la línea abierta, es decir sin resistencia de carga, no fluye corriente eléctrica en el circuito.
 - La onda eléctrica formada por los campos E, llega al final de la línea y se refleja hacia el generador porque no encuentra carga para disiparse o radiarse. No se experimenta ninguna radiación.
- Línea de transmisión terminada en antena. Referencia: Leyes de Gauss y de Ampere.
 - Si se aplica un voltaje (Vs) a una línea de transmisión de 2 conductores, se genera un campo E entre ellos, ya que acumulan cargas opuestas. La dirección de los campos E se invierte en cada semiciclo del voltaje.
 - Si los extremos de la línea se doblan en 90º, se obtiene una antena dipolo que se comporta como una resistencia de carga que hace fluir una corriente eléctrica / por la línea. Esta corriente genera, a su vez, un campo H alrededor de los conductores. La dirección de la corriente y de los campos H se invierte en cada semiciclo del voltaje.
 - Gracias a la antena, se experimenta la radiación del Campo E. La antena dipolo es un elemento radiante.





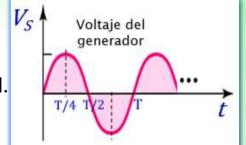


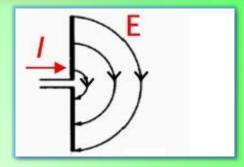
Mecanismos de radiación y propagación de ondas

RADIACIÓN Y PROPAGACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

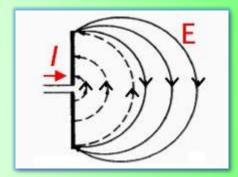
El fenómeno del desprendimiento - Radiación

- Radiación. Referencia: Leyes de Gauss para Campos E y de Ampere-Maxwell.
 - En el primer 1/4 de ciclo del voltaje (dirección de corriente / hacia la antena), se acumulan cargas positivas en el conductor superior y negativas en el inferior. El circuito se cierra a través de la corriente de desplazamiento que siguen las líneas de campo E.

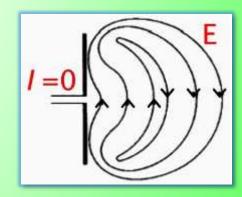




■ En el siguiente 1/4 de ciclo, las líneas de campo E aun se propagan, pero la carga de los conductores disminuye porque empiezan a introducirse cargas opuestas (la corriente / disminuye), generándose líneas de campo E opuestas.



- Cuando el voltaje es 0 (corriente / = 0) la neutralización de las cargas en los conductores hace que las líneas de campo E se cierren sobre sí mismas.
- En el siguiente medio ciclo se repite el proceso pero en dirección opuesta, y así sucesivamente. Las ondas que se desprenden comienzan a propagarse respondiendo a los postulados de las leyes de Ampere—Maxwell y de Faraday.
- La onda que se radia es una onda esférica.

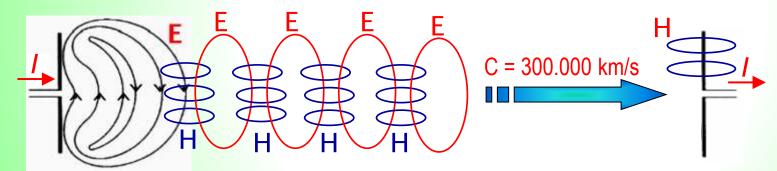


Mecanismos de radiación y propagación de ondas

RADIACIÓN Y PROPAGACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Propagación electromagnética

- Propagación. Referencia: postulados de las Leyes de Ampere—Maxwell y de Faraday.
 - De acuerdo con la hipótesis de la corriente de desplazamiento (Ampere-Maxwell), un campo E que varía en el tiempo, induce un campo H también variable en el tiempo.
 - De acuerdo con Faraday, un campo H que varía en el tiempo, induce un campo E también variable en el tiempo.
 - Los dos campos existen al mismo tiempo, es decir, existe el campo electromagnético que se propaga a la velocidad de la luz.



- En el sitio distante, el campo H rodea a la antena receptora e induce una corriente de conducción I, con lo que se establece una comunicación por radio.
- La energía eléctrica y magnética se convierte en electromagnética. La onda electromagnética se propaga respondiendo a los postulados de Maxwell.

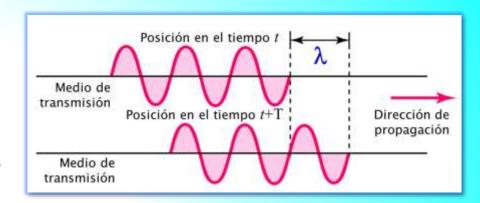
4. LONGITUD DE ONDA Y FRECUENCIA

RADIACIÓN Y PROPAGACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

¿Qué es la longitud de onda y cómo se calcula?

(Blake, 2004)

- La longitud de onda es la distancia λ que una onda viaja a través de un medio de transmisión en un periodo de tiempo T.
- ¿Cómo se calcula? En función de la velocidad y la frecuencia de la onda. De las Ecuaciones de Maxwell se establece que la onda de radio se desplaza en el aire a la velocidad de la luz c.



$$v = \frac{d}{t} \implies c = \frac{\lambda}{T} = \lambda f \implies \lambda = \frac{c}{f}$$

c = velocidad de la luz, 300.000 km/s.

 λ = longitud de onda, en m.

T = periodo, en s.

f= frecuencia de la onda, en Hz.

- v = velocidad, en m/s.
- d = distancia, en m.

t = tiempo, en s.

- Ejemplo 1. Longitudes de onda. Calcule la longitud de onda en el espacio libre correspondiente a una frecuencia de:
 - a) 1 MHz (utilizada en radiodifusión comercial AM).
 - b) 900 MHz (utilizada en telefonía celular).
 - c) 4 GHz (utilizada en televisión por satélite)
- A partir de 1 GHz las ondas se describen como microondas.

- a) $\lambda = 300$ m.
- b) $\lambda = 33.3$ cm.
- c) $\lambda = 7.5$ cm.

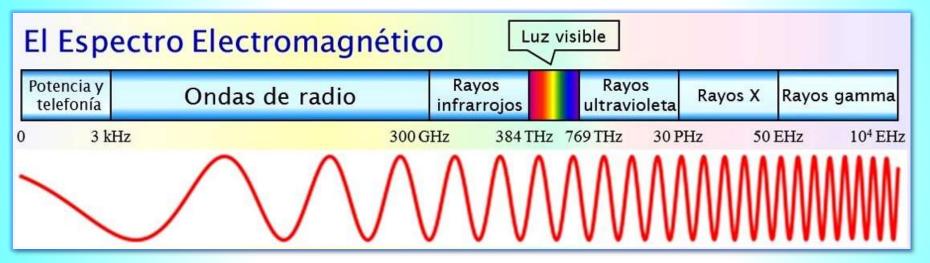
Longitud de onda y frecuencia

RADIACIÓN Y PROPAGACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

El espectro electromagnético

(Frenzel, 2003) (Forouzan, 2020)

Es el conjunto de ondas electromagnéticas ordenadas de acuerdo a su frecuencia y longitud de onda. La parte del espectro ente 3 kHz y 900 THz es usada para la comunicación inalámbrica. A mayor frecuencia menor longitud de onda, y viceversa.



- Aunque no hay una separación clara entre ondas de radio y microondas, las ondas entre las frecuencias de 3 kHz y de 1 GHz se denominan normalmente ondas de radio y las ondas con frecuencias entre 1 GHz y 300 GHZ se denominan microondas.
 - Las ondas de radio, en su mayor parte, son omnidireccionales. Cuando una antena transmite ondas de radio se propaga en todas las direcciones. Son útiles para envíos multipuntos, en los que hay un transmisor pero muchos receptores.
 - Las microondas son directivas. Cuando una antena transmite microondas se puede enfocar de forma muy precisa. Son útiles para envíos punto a punto, entre un transmisor y un receptor.

Longitud de onda y frecuencia

RADIACIÓN Y PROPAGACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Bandas de las ondas de radio

(Frenzel, 2003)

- Cuando entró en uso un sistema para etiquetar las frecuencias, sólo se consideraron las bandas de bajas, medias y altas frecuencias (LF, MF y HF); nadie esperaba rebasar los 30 MHz.
- Cuando se rebasaron los 30 MHz, se asignaron nombres tanto hacia arriba como hacia abajo. Así que las más altas se denominaron bandas de muy, ultra, súper y extremadamente alta frecuencia (VHF, UHF, SHF y EHF).
- Más allá ya no hay nombres; sin embargo, se han sugerido las siguientes designaciones: tremendamente, increíblemente, asombrosamente y prodigiosamente alta frecuencia (THF, IHF, ASH y PHF).
- La palabra radio viene de radius, que significa rayo en Latín.

Rango	Banda	f_{min}	$f_{máx}$	$\lambda_{máx}$	λ_{min}
Potencia y telefonía	ELF	0	3 KHz	0	100 Km
Ondas de radio	VLF	3 KHz	30 KHz	100 Km	10 Km
	LF	30 KHz	300 KHz	10 Km	1 Km
	MF	300 KHz	3 MHz	1 Km	100 m
	HF	3 MHz	30 MHz	100 m	10 m
	VHF	30 MHz	300 MHz	10 m	1 m
	UHF	300 MHz	3 GHz	1 m	10 cm
	SHF	3 GHz	30 GHz	10 cm	1 cm
	EHF	30 GHz	300 GHz	1 cm	1 mm

5. ESQUEMA DE UNA COMUNICACIÓN POR RADIO

RADIACIÓN Y PROPAGACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Elementos de un sistema de comunicación por radio

(Kraus, 2000)

Potencia

- Transmisor. Genera una potencia P_G que entrega a la antena a través de una línea de transmisión para ser transmitida P_T . La potencia de transmisión P_G la especifica el fabricante del transmisor, generalmente, más de 30 mW.
- Línea de transmisión. Guía la potencia generada hacia la antena, en forma de onda plana TEM (Transversal Eléctrica Magnética). Se supone que el espacio entre sus conductores es mucho menor que λ. Parte de potencia se pierde en la línea de transmisión. La pérdida para un coaxial corto con conectores es de 2 a 3 dB.
- La radiación se produce porque la antena se presenta a la línea como una resistencia del espacio (virtual) acoplada a sus terminales, se la denomina resistencia de radiación.
- transmitida recibida Potencia Sensibilidad generada del receptor Línea o guía Transmisor Receptor o Generador Ganancia Frecuencia J de operación receptora transmisora 2 Longitud de onda eq Área equivalente de absorción Distancia radial entre antenas

Potencia

Antena transmisora. Radia la potencia P_T que le llega del transmisor. Su característica determina la eficacia de esa radiación, manifestada en la ganancia G_T . Es un dispositivo pasivo que crea el efecto de amplificación debido a su forma física. Tiene las mismas características cuando transmite que cuando recibe. La onda que radia es una onda esférica. Las antenas omnidireccionales tienen una ganancia de 5 a 12 dBi. Las sectoriales de 12 a 15 dBi. Las parabólicas de 19 a 24 dBi.

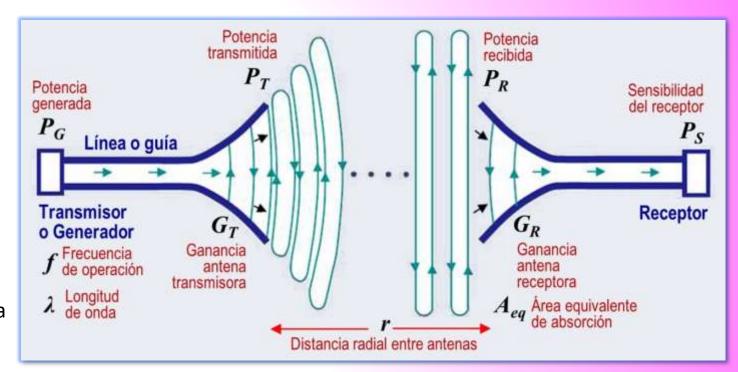
Esquema de una comunicación por radio

RADIACIÓN Y PROPAGACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Elementos de un sistema de comunicación por radio (cont.)

(Kraus, 2000)

- Onda en el espacio libre. La onda esférica radiada se visualiza como plana cuando llega a la antena receptora que se encuentra en campo lejano. La onda pierde potencia porque se esparce en el espacio. La pérdida aumenta con la distancia r y la frecuencia f, pero disminuye con la ganancia G_T y G_R de las antenas.
- Antena receptora. Absorbe la potencia P_R del frente de onda que le llega, desde un área equivalente de absorción A_{eq} . Sus características determinan la eficacia de esa absorción, manifestada por la ganancia G_R .



■ Receptor. Recibe, a través de la línea de transmisión, la potencia P_R que absorbe la antena receptora. Su característica principal es su sensibilidad P_S especificada por el fabricante. La sensibilidad es el nivel mínimo de potencia que debe recibir para una determinada calidad; generalmente en el rango de -75 a -95 dBm.

Referencias bibliográficas RADIACIÓN Y PROPAGACIÓN ELECTROMAGNÉTICA Referencias bibliográficas FIN APC, Asociación para el progreso de las comunicaciones (2007). Redes Inalámbricas en los Países en Desarrollo. Mountain View, CA. USA: Limehouse Book Sprint Team. Blake, Roy (2004). Sistemas electrónicos de comunicaciones. México: Thomson. Frenzel (2003). Sistemas Electrónicos de Comunicaciones. Madrid: Alfaomega. Forouzan, B. A. (2020). *Transmisión de datos y redes de comunicaciones*. Madrid: McGraw-Hill. Kraus, J., & Fleisch, D. (2000). Electromagnetismo con Aplicaciones. México: McGraw-Hill. RadioMobile. RadioMobile. Recuperado el 16 de marzo de 2015, de http://www.cplus.org/rmw/english1.html. Stallings, William (2007). Data and Computer Communication. New Jersey: Pearson. COMUNICACIÓ