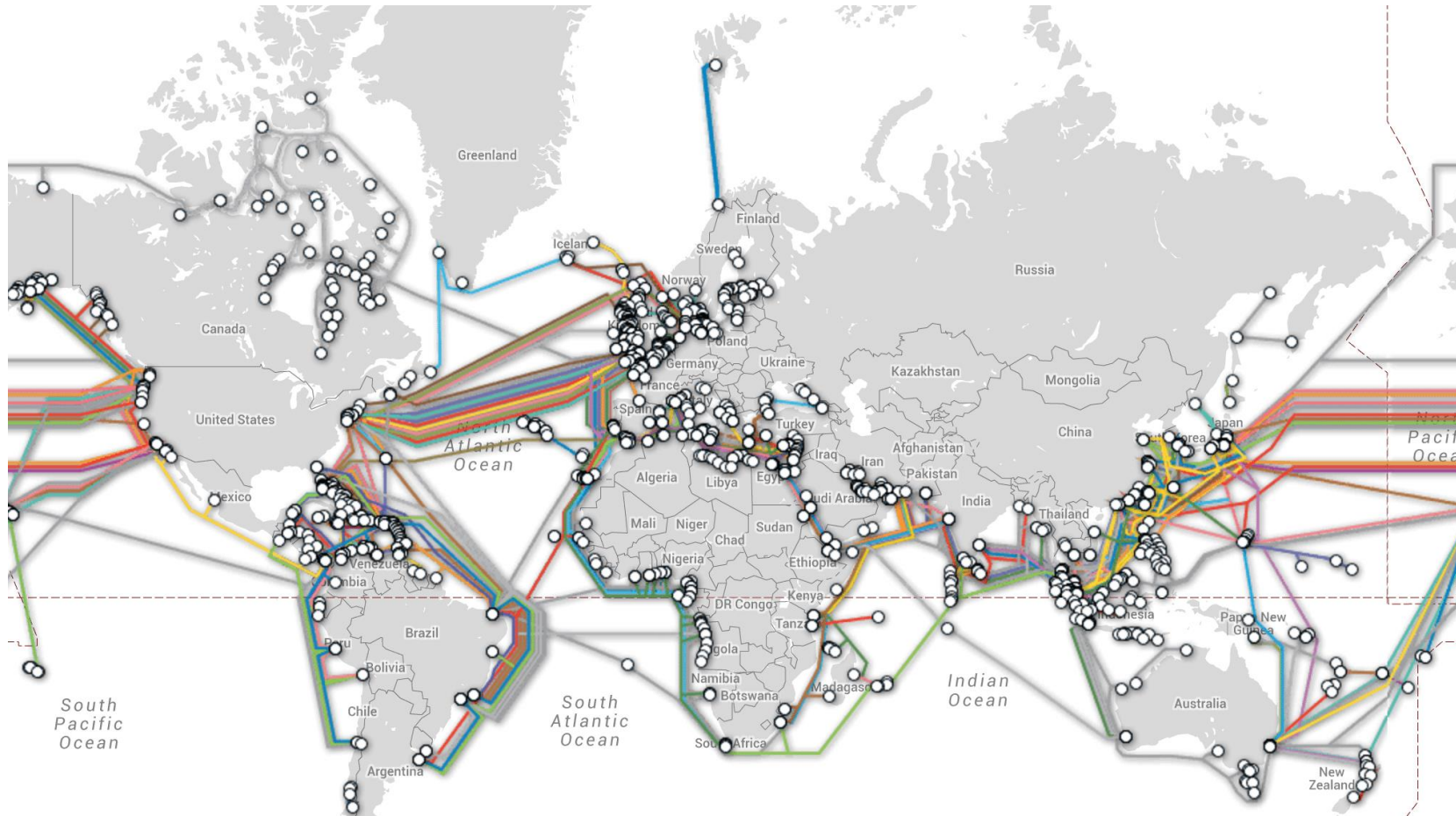


Medios de transmisión



- Docente: M. Sc. Ing. David Sustach Garcia.

Magister en Aplicación de Tecnologías Espaciales, graduado de la Universidad de Aeronáutica y Astronáutica de Beijing (Beihang University) bajo el auspicio del Centro Regional de Educación en Ciencia y Tecnología Espaciales en Asia y el Pacífico (RCSSTEAP-China)

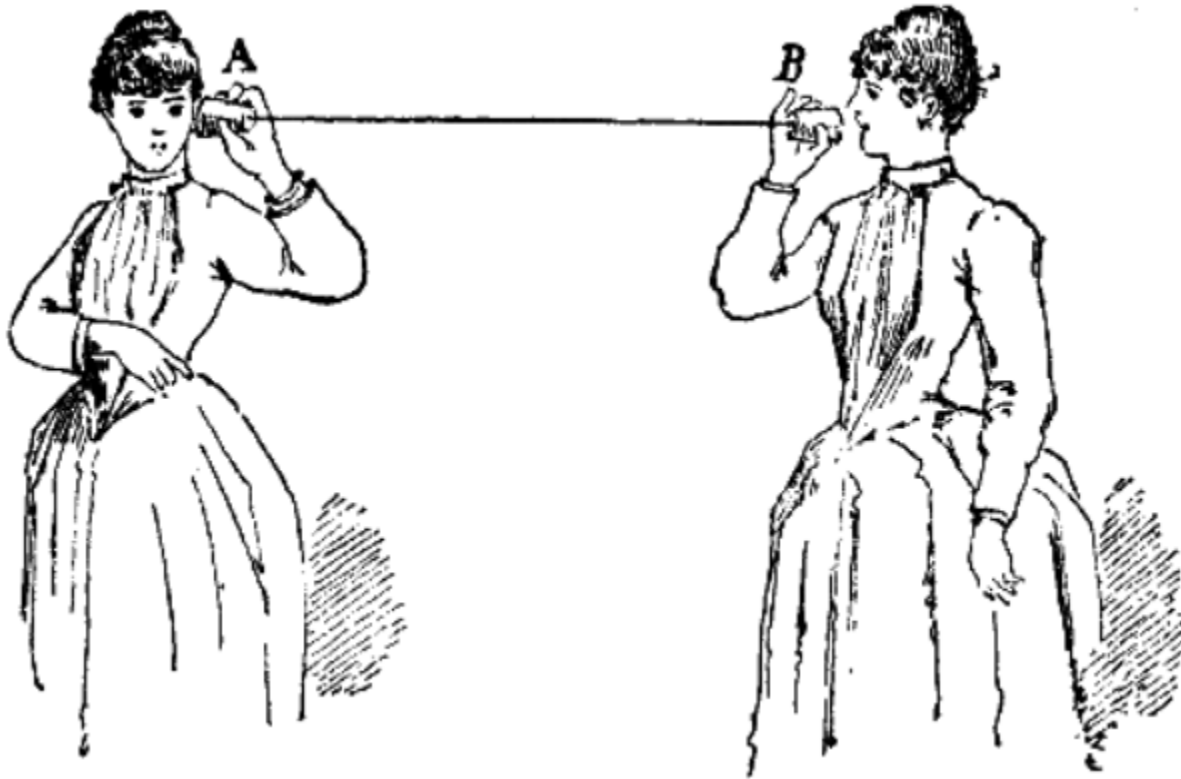
Tarija, noviembre 2019

Contenido

- Introduction.
- Medios de Transmisión
- Aspectos generales



Telecomunicaciones



- Es la transmisión y recepción de **señales de cualquier naturaleza**, típicamente electromagnéticas **a través de un medio**, que contengan signos, sonidos, imágenes o, en definitiva, cualquier tipo de información que se desee comunicar a cierta distancia.

Morse



A . —
B — . . .
C — . — .
D — . .
E .
F . . — .
G — — .
H
I . .
J . — — —
K — . —
L . — . .
M — —
N — .
O — — —
P . — — .
Q — — . —
R . — .
S . . .
T —

U . . —
V . . . —
W . — —
X — . . —
Y — . — —
Z — — . .

1 . — — — —
2 . . — — —
3 . . . — —
4 —
5
6 —
7 — — . . .
8 — — — . .
9 — — — — .
0 — — — — —

- En 1837, Samuel Morse y Alfred Vail estaban trabajando en un sistema de telégrafo eléctrico.
- Se trataba del telégrafo Morse, que permitía transmitir mensajes mediante pulsos eléctricos cifrados en el código Morse, también inventado por él.

Clasificación

Dependiendo de la **forma de conducir la señal a través del medio**, los medios de transmisión se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- Medios de transmisión **guiados**

- El par trenzado

- El cable coaxial

- La fibra óptica

- Medios de transmisión **no guiados**

- Radio

- Microondas

- Luz (infrarrojos/láser).

- **Según el sentido de la transmisión** podemos encontrarnos con 3 tipos diferentes:

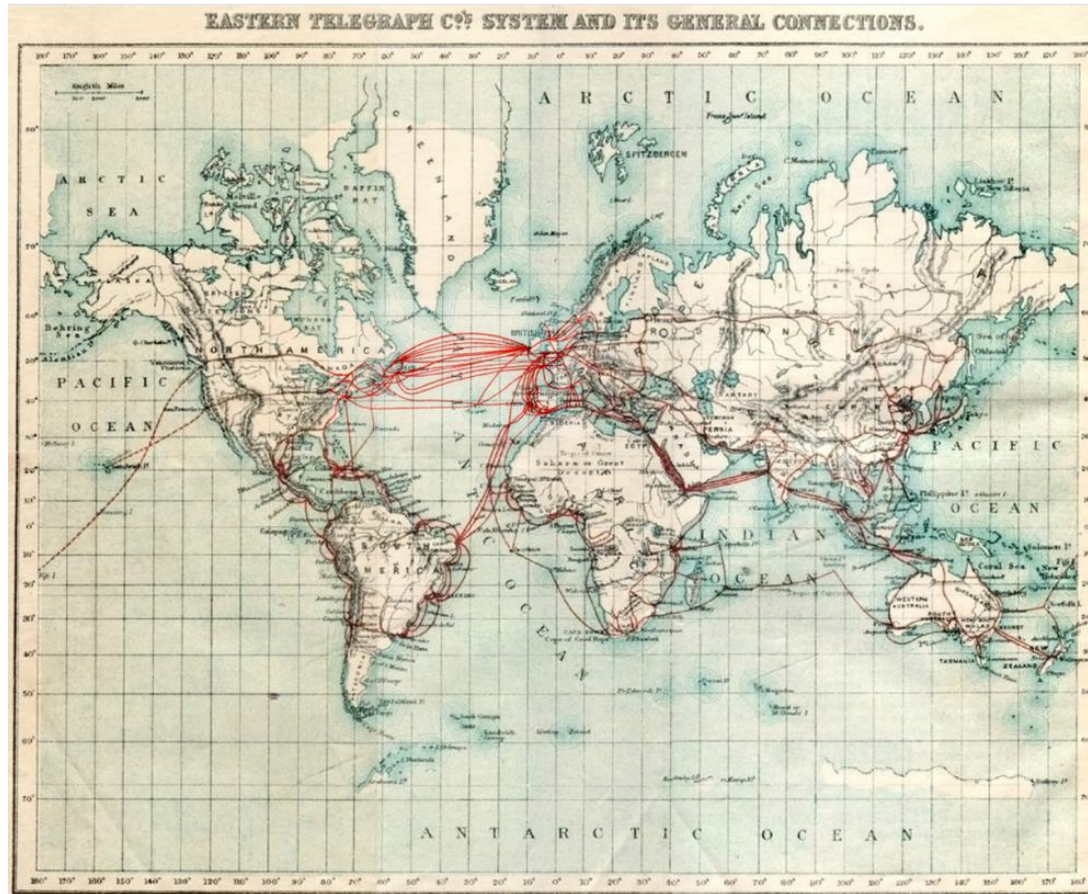
- Simplex

- Half-Duplex

- Full-Duplex.

También los medios de transmisión se caracterizan por utilizarse en rangos de frecuencia de trabajo diferentes.

Medios de Transmisión Guiados



- Los medios de transmisión guiados están constituidos por cables que se encargan de la conducción (o guiado) de las señales desde un extremo al otro
- Las principales características de los medios guiados son el **tipo de conductor utilizado**, que determina entre otros: la velocidad máxima de transmisión, las distancias máximas que puede ofrecer entre repetidores, la inmunidad frente a interferencias electromagnéticas, la facilidad de instalación y la capacidad de soportar diferentes tecnologías de nivel de enlace.

Medios de Transmisión No Guiados



- La comunicación inalámbrica o sin cables es aquella en la que el medio de transmisión no guía la propagación de la información, sino que se utiliza la modulación de ondas electromagnéticas a través del espacio.

Eléctrico

Cable coaxial



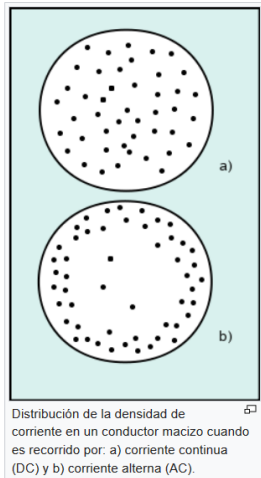
Cable Par trenzado



Fibra óptica



- Los medios de transmisión guiados están constituidos por cables que se encargan de la conducción (o guiado) de las señales desde un extremo al otro. Las principales características de los medios guiados son el tipo de conductor utilizado, la velocidad máxima de transmisión, las distancias máximas que puede ofrecer entre repetidores, la inmunidad frente a interferencias electromagnéticas, la facilidad de instalación y la capacidad de soportar diferentes tecnologías de nivel de enlace

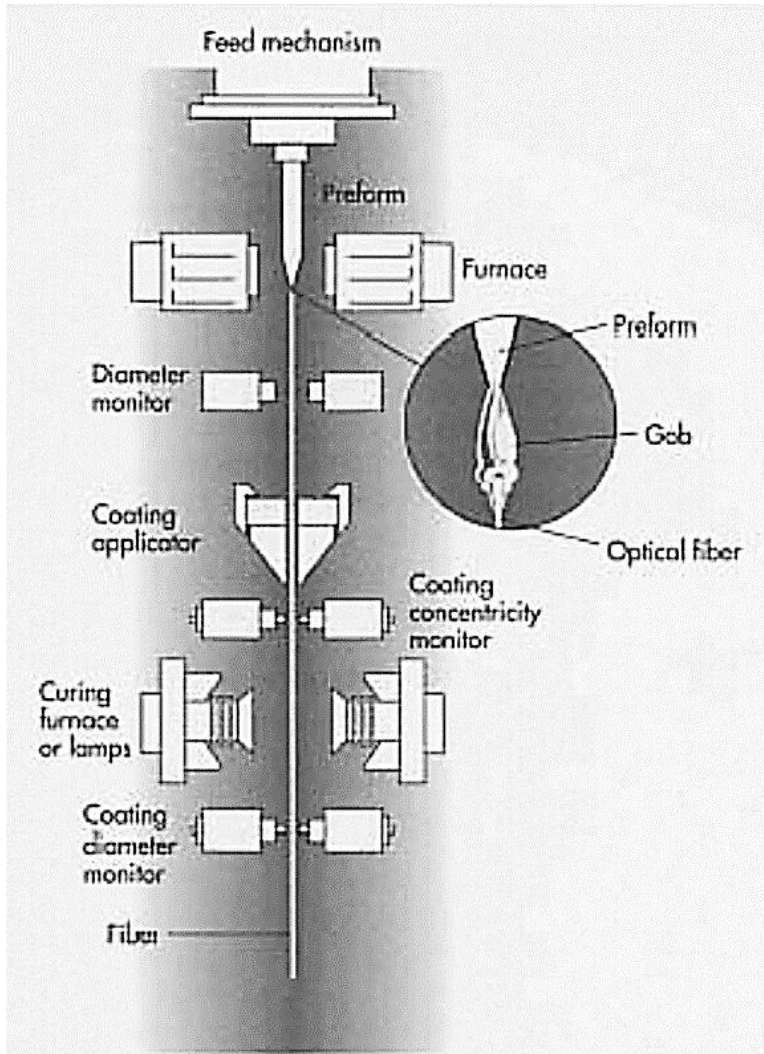


Distribución de la densidad de corriente en un conductor macizo cuando es recorrido por: a) corriente continua (DC) y b) corriente alterna (AC).

Este efecto es apreciable en conductores de grandes secciones, especialmente si son macizos. Aumenta con la frecuencia, en aquellos conductores con cubierta metálica o si están arrollados en un núcleo ferromagnético o huecos.

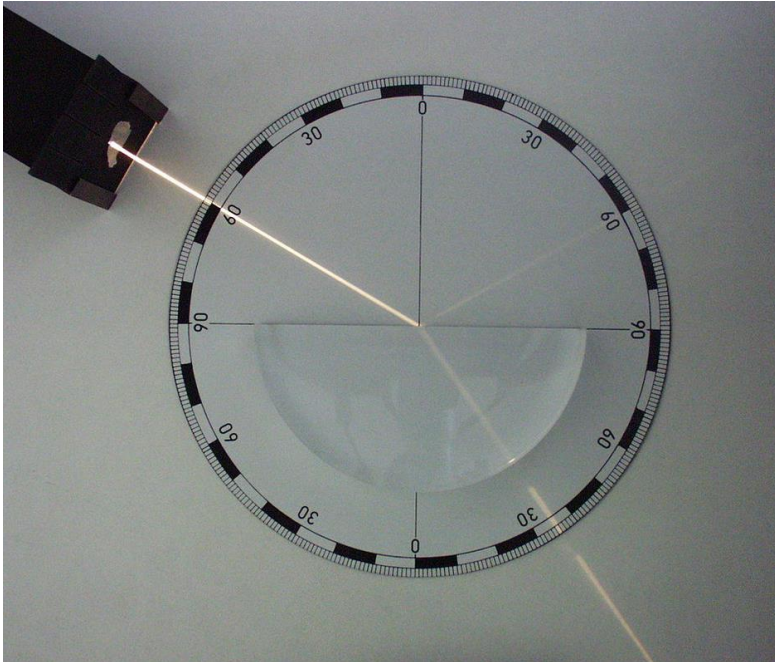
En frecuencias altas los electrones tienden a circular por la zona más externa del conductor, en forma de corona, en vez de hacerlo por toda su sección, con lo que, de hecho, disminuye la sección efectiva por la que circulan estos electrones aumentando la resistencia del conductor.

Óptico

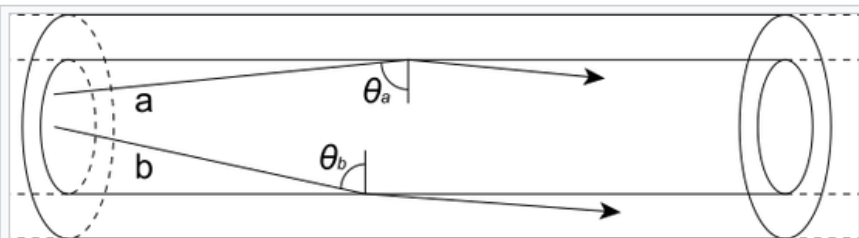


- La fibra óptica consiste en un hilo muy fino de material transparente, vidrio o materiales plásticos, por el que se envían pulsos de luz que representan los datos a transmitir.
- El haz de luz queda completamente confinado y se propaga por el interior de la fibra con un ángulo de reflexión por encima del ángulo límite de reflexión total, en función de la ley de Snell. La fuente de luz puede provenir de un láser o un diodo led.

Fabricación: Después de preparar la preforma de vidrio sólido, se transfiere a un sistema de dibujo vertical. En este sistema, la preforma se calienta primero. Mientras lo hace, se forma una gota de vidrio fundido en su extremo y luego se cae, permitiendo que se extraiga la fibra óptica interior. La fibra luego pasa a través de la máquina, donde se verifica su diámetro, se aplica una capa protectora y se cura con calor. Finalmente, se enrolla en un carrete.

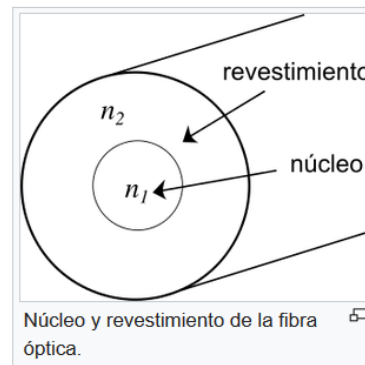


- Los principios básicos de su funcionamiento se justifican aplicando las leyes de la óptica geométrica, principalmente, la ley de la refracción (principio de reflexión interna total) y la ley de Snell.
- Su funcionamiento se basa en transmitir por el núcleo de la fibra un haz de luz, tal que este no atraviese el revestimiento, sino que se refleje y se siga propagando. Esto se consigue si el índice de refracción del núcleo es mayor al índice de refracción del revestimiento, y también si el ángulo de incidencia es superior al ángulo límite



Representación de dos rayos de luz propagándose dentro de una fibra óptica. En esta imagen se percibe el fenómeno de reflexión total en el haz de luz "a".

Angulo de refracción.
Angulo de incidencia



La ley de Snell (también llamada ley de Snell-Descartes) es una fórmula utilizada para calcular el ángulo de refracción de la luz al atravesar la superficie de separación entre dos medios de propagación de la luz (o cualquier onda electromagnética) con índice de refracción distinto.

Guía de onda

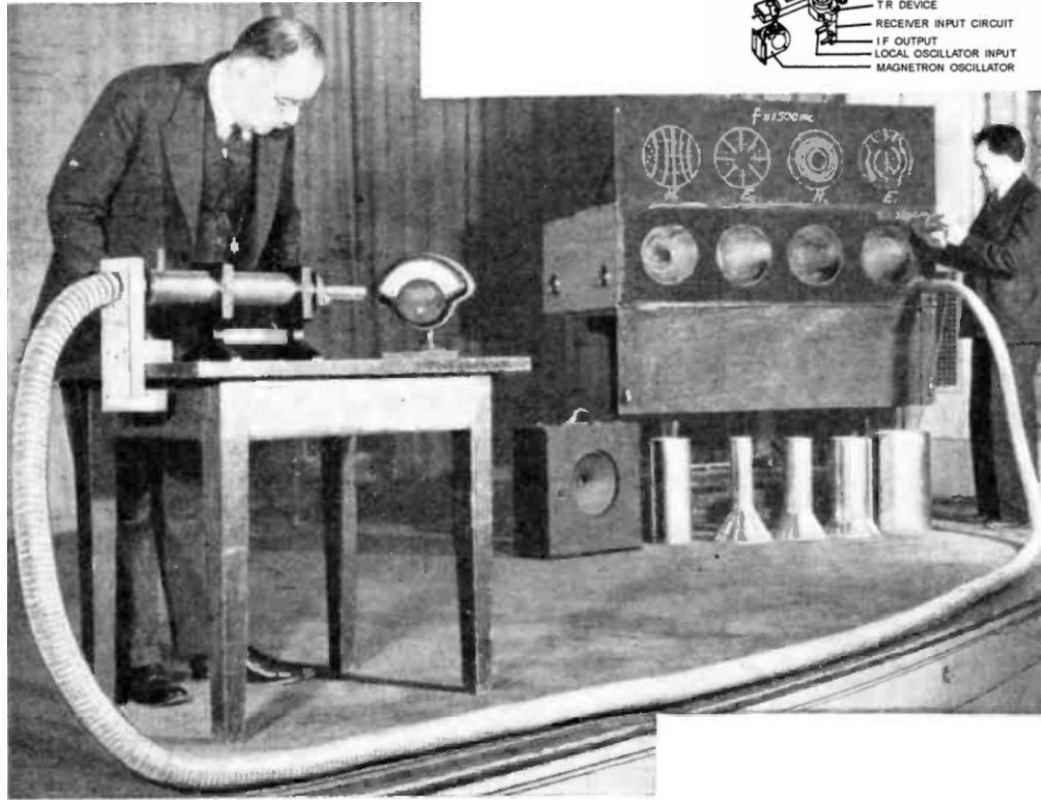
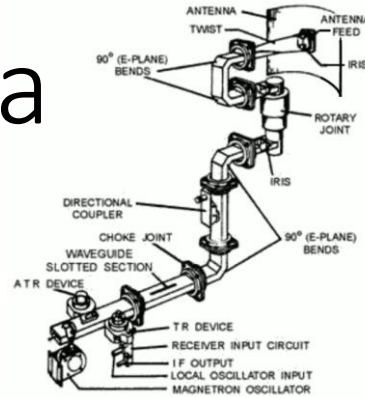
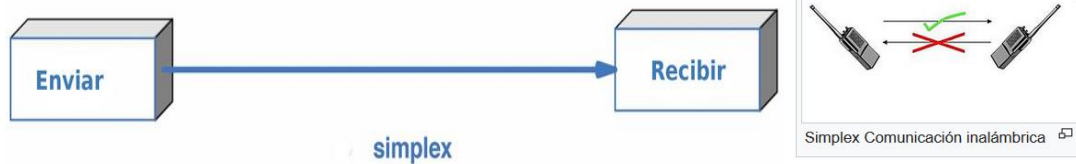


Fig. 1 Southworth demostrando una guía de ondas en la reunión de IRE en 1938, mostrando microondas de 1,5 GHz que pasan a través de la manguera de metal flexible de 7,5 m que se registra en un detector de diodos.



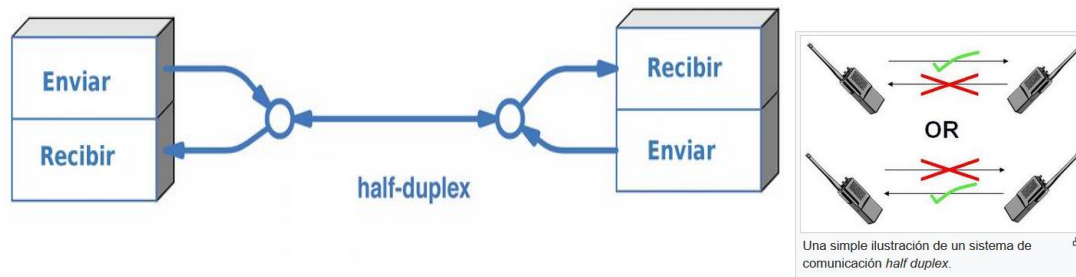
- Este nombre, se utiliza para designar los tubos de un material de sección rectangular, circular o elíptica, en los cuales la energía electromagnética ha de ser conducida principalmente a lo largo de la guía y limitada en sus fronteras.
- Mediante la guía de ondas la propagación de ondas electromagnéticas en el espacio libre, sin embargo también se puede transmitir información mediante el confinamiento de estas ondas en cables o guías

Según sentido de la transmisión



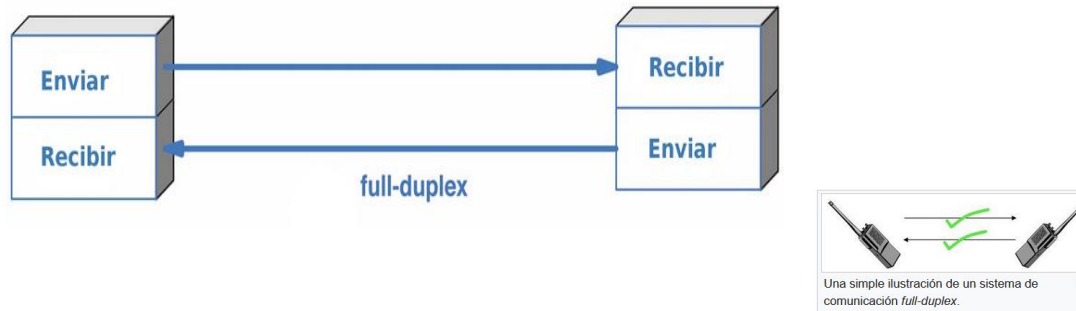
Simplex

La comunicación símplex es un canal de comunicación que envía información en una sola dirección. Según la Unión de Telecomunicación Internacionales un canal de comunicaciones que opera en una dirección a la vez, pero que puede ser reversible



Half Duplex

Una conexión semidúplex (a veces denominada una conexión alternada) es una conexión en la que los datos fluyen en una u otra dirección, pero no las dos al mismo tiempo



Full Duplex

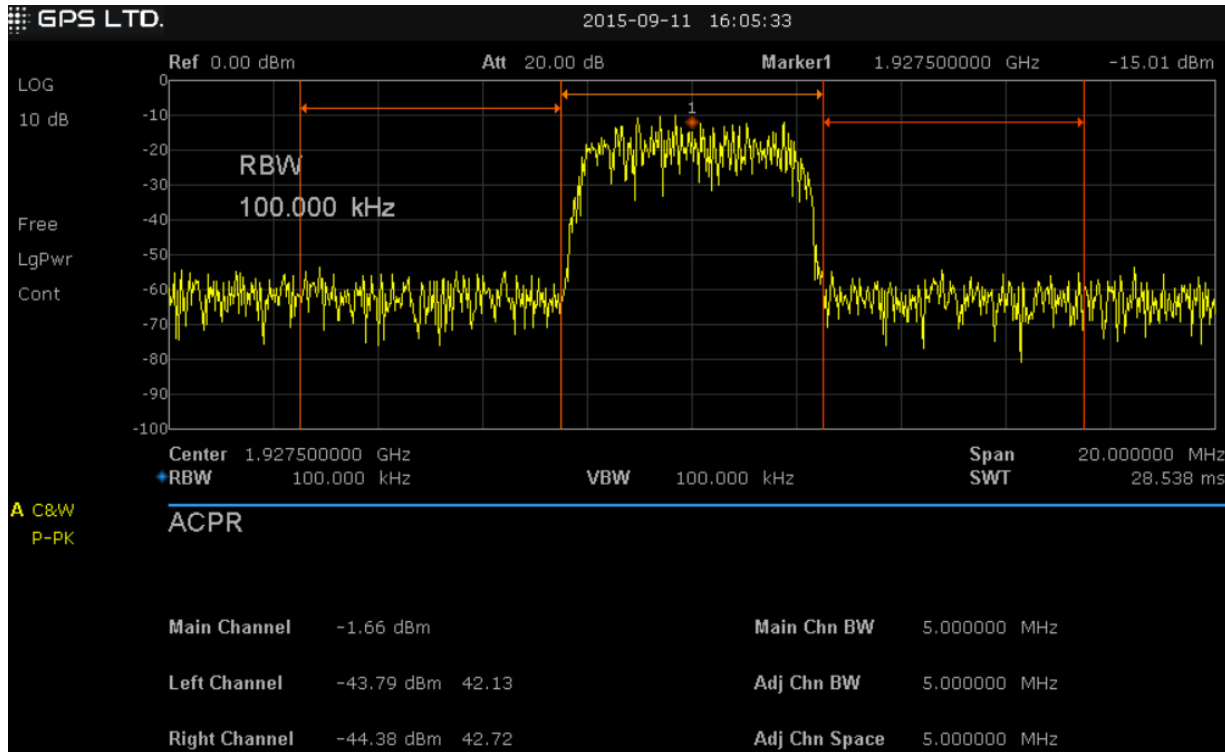
La mayoría de los sistemas y redes de comunicaciones modernos funcionan en modo dúplex permitiendo canales de envío y recepción simultáneos

Aspectos generales de los Medios de transmisión

- **Ancho de Banda**

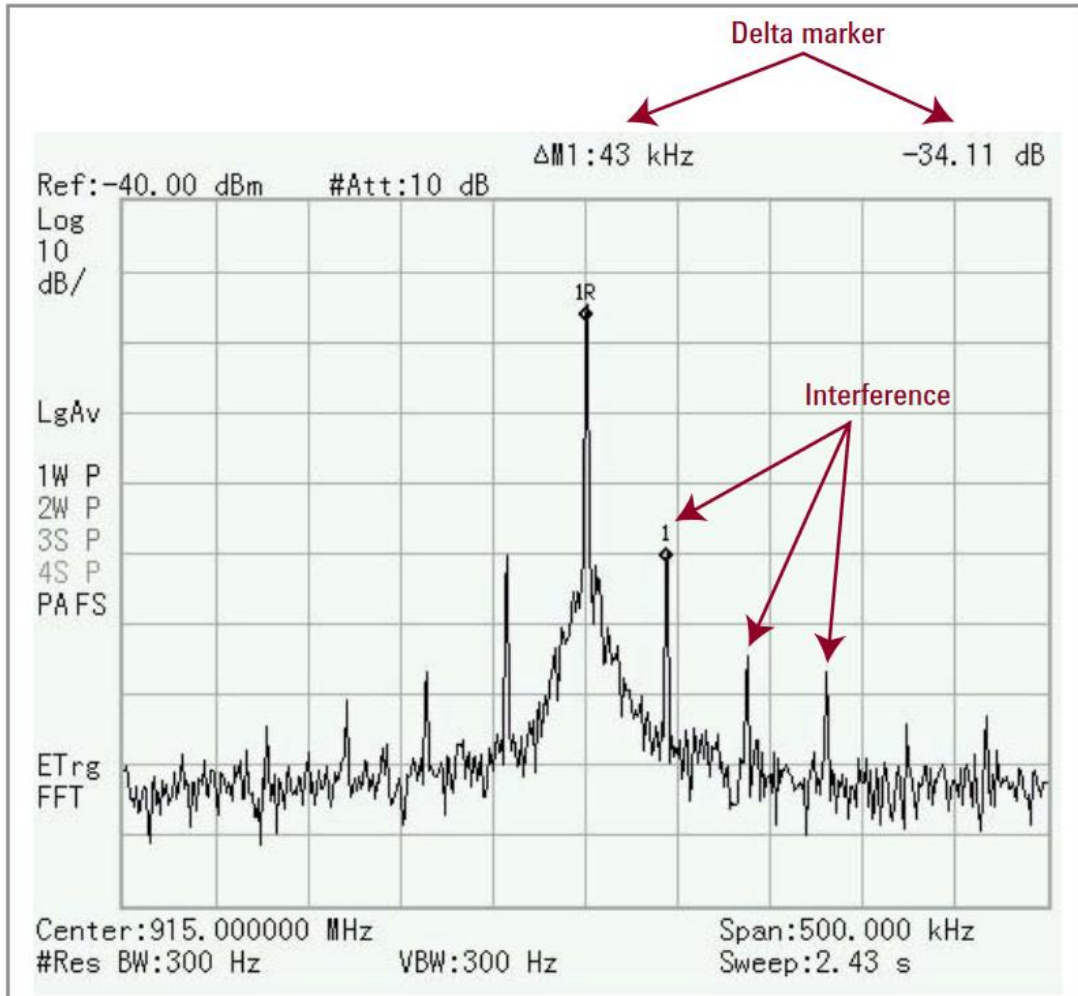
Para señales analógicas, el ancho de banda es la longitud, medida en Hz, de la extensión de frecuencias en la que se concentra la mayor potencia de la señal. Se puede calcular a partir de una señal temporal mediante el análisis de Fourier. Las frecuencias que se encuentran entre esos límites se denominan también frecuencias efectivas.

El ancho de banda en transmisiones digitales, es la longitud de la extensión de la onda en donde se concentra la mayor potencia de la señal.



El ancho de banda en transmisiones digitales, el término tasa de bits define el número de bits que se transmiten por unidad de tiempo a través de un sistema de transmisión digital o entre dos dispositivos digitales. Así pues, es la velocidad de transferencia de datos.

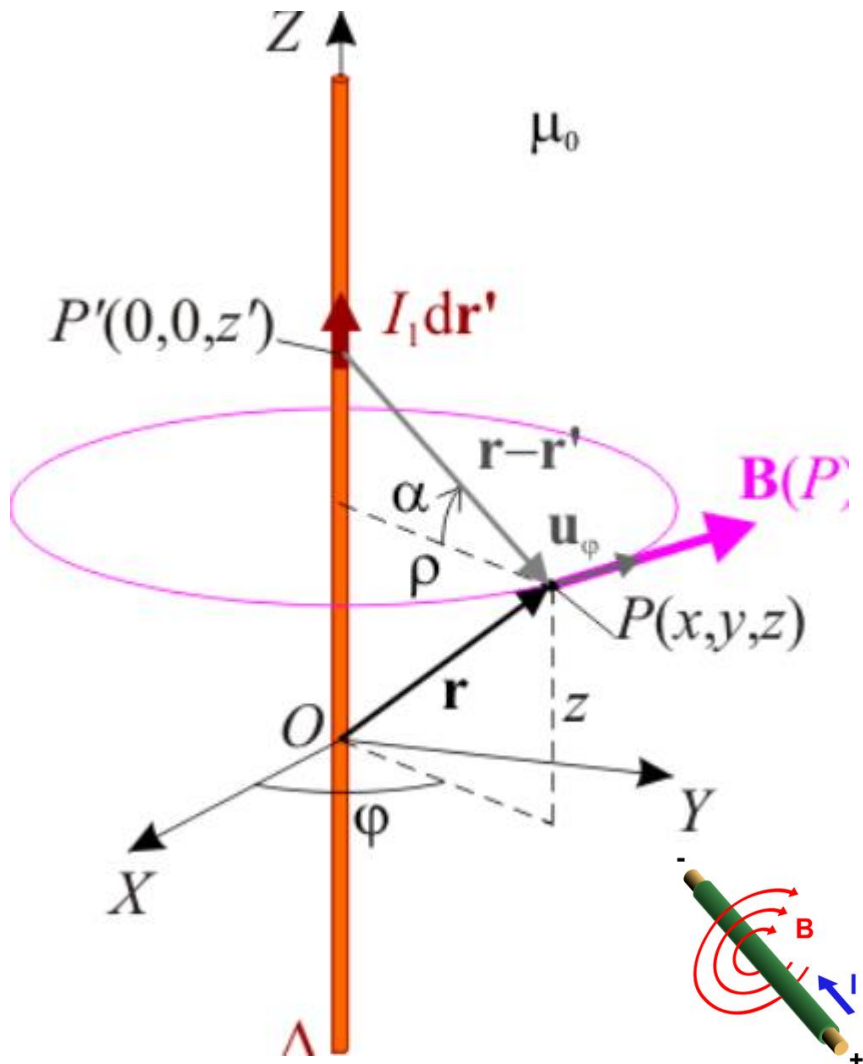
• Interferencia electromagnética



La interferencia electromagnética es la perturbación que ocurre en cualquier circuito, componente o sistema electrónico causado por una fuente externa al mismo. También se conoce como EMI por sus siglas en inglés (ElectroMagnetic Interference), Radio Frequency Interference o RFI. Esta perturbación puede interrumpir, degradar o limitar el rendimiento de ese sistema. La fuente de la interferencia puede ser cualquier objeto, ya sea artificial o natural, que posea corrientes eléctricas que varíen rápidamente, como un circuito eléctrico, el Sol o las auroras boreales

Co Canal: Operan en el mismo ancho de banda del canal en el que está operando el receptor, su nivel depende de las características de rechazo cocanal del receptor y las características de emisión del transmisor.

Canal Adyacente: Opera en el canal adyacente y su nivel depende de las características de filtrado del receptor

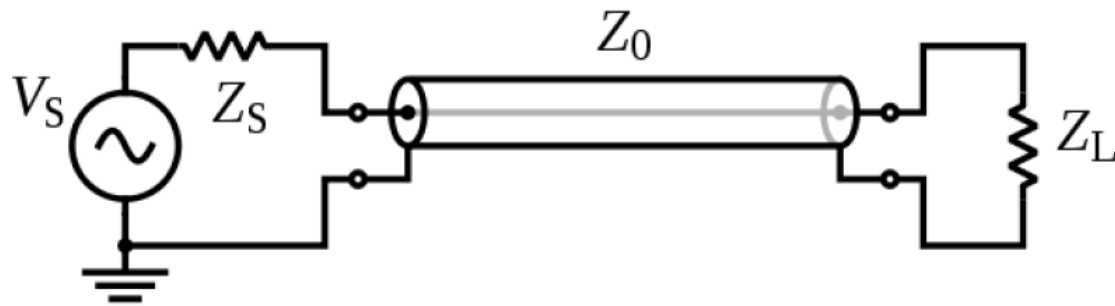
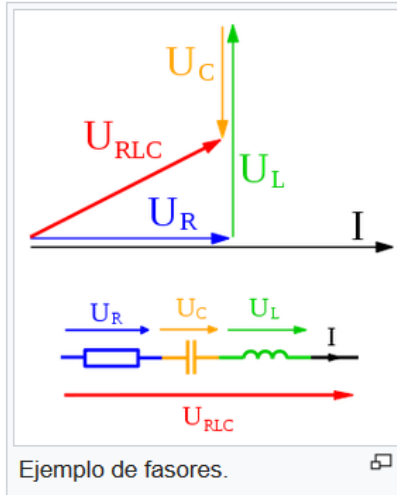


• Campo magnético inducido

La circulación de una corriente eléctrica a través de un conductor, genera un campo magnético entorno a dicho conductor. De igual forma, cualquier campo magnético entorno a un conductor puede inducir una corriente eléctrica en este. Eso podría considerarse una interferencia.

Para evitar este fenómeno se utilizan cables eléctricos apantallados.

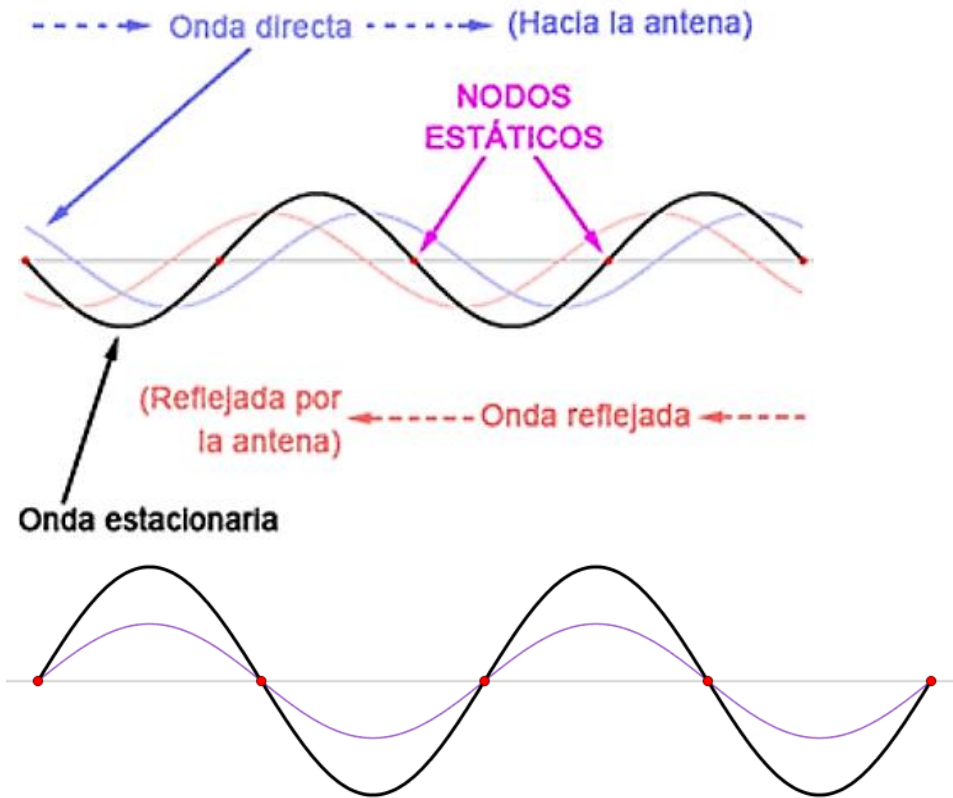
- **Impedancia característica**



La impedancia (Z) es una medida de oposición que presenta un circuito a una corriente cuando se aplica una tensión. La impedancia extiende el concepto de resistencia a los circuitos de corriente alterna (CA), y posee tanto magnitud como fase, a diferencia de la resistencia, que sólo tiene magnitud.

Cuando un circuito es alimentado con corriente continua (CC), su impedancia es igual a la resistencia, lo que puede ser interpretado como la impedancia con ángulo de fase cero.

REPRESENTACIÓN DE UNA ONDA ESTACIONARIA



• Reflexión. Onda estacionaria. ROE (SWR)

Cuando se produce una transmisión de señales en un medio de transmisión, la señal que transmitimos desde la fuente (emisor) a la carga (receptor o medio de transmisión) la llamamos onda incidente.

Cuando las impedancias del sistema están adaptadas $Z_S = Z_0 = Z_L$, toda la onda incidente se transmite a la carga, pero cuando no existe esa adaptación, una parte de la onda incidente se transmite y otra parte se refleja y vuelve en sentido contrario a esta, tomando el nombre de onda reflejada

Una onda estacionaria se forma por la interferencia de dos ondas de la misma naturaleza con igual amplitud, longitud de onda (o frecuencia) que avanzan en sentido opuesto a través de un medio.

Se producen cuando interfieren dos movimientos ondulatorios con la misma frecuencia, amplitud pero con diferente sentido, a lo largo de una línea con una diferencia de fase de media longitud de onda.



Medios de transmisión electromagnéticos

- Introducción
- Líneas de transmisión
- Ondas longitudinales, transversales



Introducción e Historia de los medios de transmisión electromagnéticos.

Sistemas de comunicación alámbricos e inalámbricos

- Esencialmente, un sistema de comunicaciones permite transmitir y/o recibir información. Los componentes y las características del sistema determinan qué tipo de información (telefonía, televisión, música, datos de computadoras, etc.) puede ser transmitida o recibida, cuánta (número de canales o velocidad de los datos), en qué frecuencias, con qué rapidez y fidelidad, a qué distancia, a qué costo y con qué tanta cobertura, además de su grado de inmunidad a interrupciones, interinterferencias o actos de vandalismo, y varios otros parámetros de operación.

Líneas de transmisión

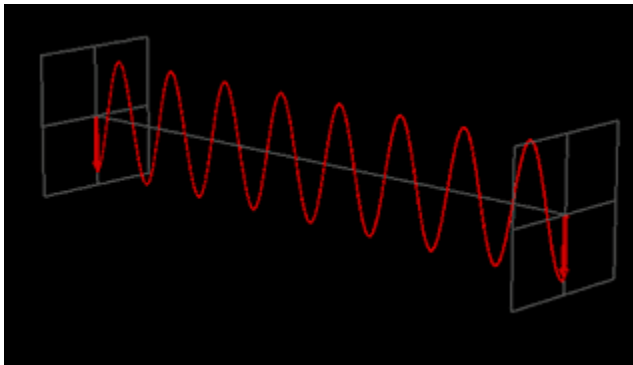
Introducción

- Una línea de transmisión es un sistema de conductores metálicos para transferir energía eléctrica de un punto a otro.
- Una línea de transmisión consiste en dos o más conductores separados por un aislador.
- Se pueden usar las líneas de transmisión para propagar cd o ca de baja frecuencia, como la corriente eléctrica de 60 ciclos y las señales de audio; también se pueden usar para propagar frecuencias muy altas, como las señales de frecuencia intermedia y de radiofrecuencia.
- Cuando propagan señales de baja frecuencia, **el comportamiento de una línea de transmisión es bastante sencillo y muy predecible; sin embargo, cuando propagan señales de alta frecuencia se complican las características de las líneas de transmisión, y su comportamiento es algo especial.**

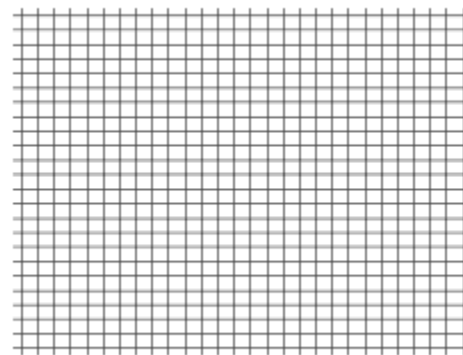
Ondas electromagnéticas transversales (EMT)

Una **onda es un movimiento oscilatorio**. La vibración de una partícula excita vibraciones semejantes en las partículas vecinas, en consecuencia, la onda viaja, o se propaga, a través de un medio

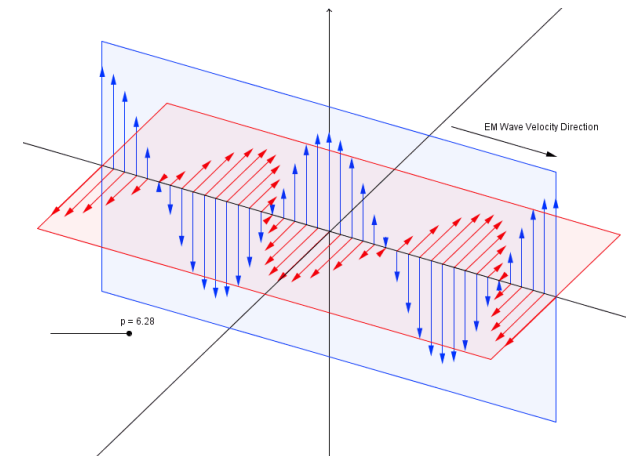
- **Onda longitudinal:** Las ondas longitudinales también se llaman ondas de compresión u ondas de compresibilidad, ya que producen compresión y rarefacción cuando viaja a través de un medio, y las ondas de presión producen aumentos y disminuciones en la presión, la dirección del desplazamiento tiene la dirección de propagación.
- **Onda transversal:** la dirección del desplazamiento es perpendicular a la dirección de la propagación.



a) Onda



b) Onda Longitudinal



b) Onda transversal

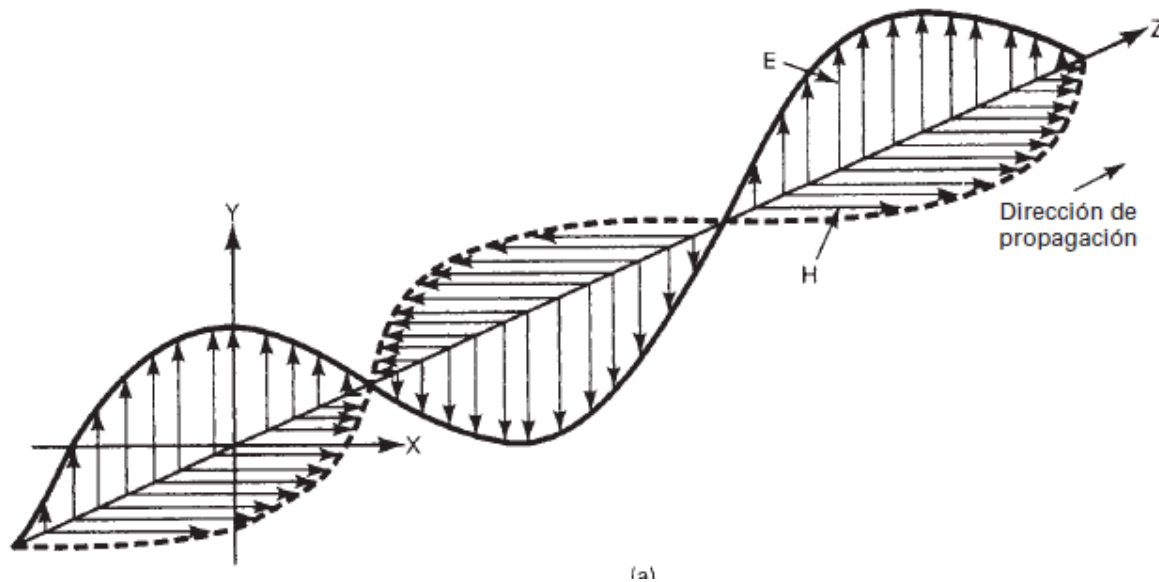


Fig. 1 Ondas electromagnéticas transversales (EMT).

- La propagación de la energía eléctrica por una línea de transmisión se hace en forma de **ondas electromagnéticas transversales (EMT)**.
- Una onda EMT se propaga principalmente en el no conductor (dieléctrico) que separa los dos conductores de una línea de transmisión. En consecuencia, la onda viaja, o se propaga, a través de un medio. Para una onda transversal, la dirección del desplazamiento es perpendicular a la dirección de propagación.
- En un conductor, la corriente y el voltaje siempre se acompañan por un campo eléctrico E y un campo magnético H en la región vecina del espacio.

- Los campos E y H son perpendiculares (en ángulo de 90°) entre sí en todos los puntos. Esto se llama cuadratura espacial. Las ondas electromagnéticas que viajan por una línea de transmisión, de la fuente a la carga, se llaman ondas incidentes, y las que regresan de la carga a la fuente se llaman ondas reflejadas.

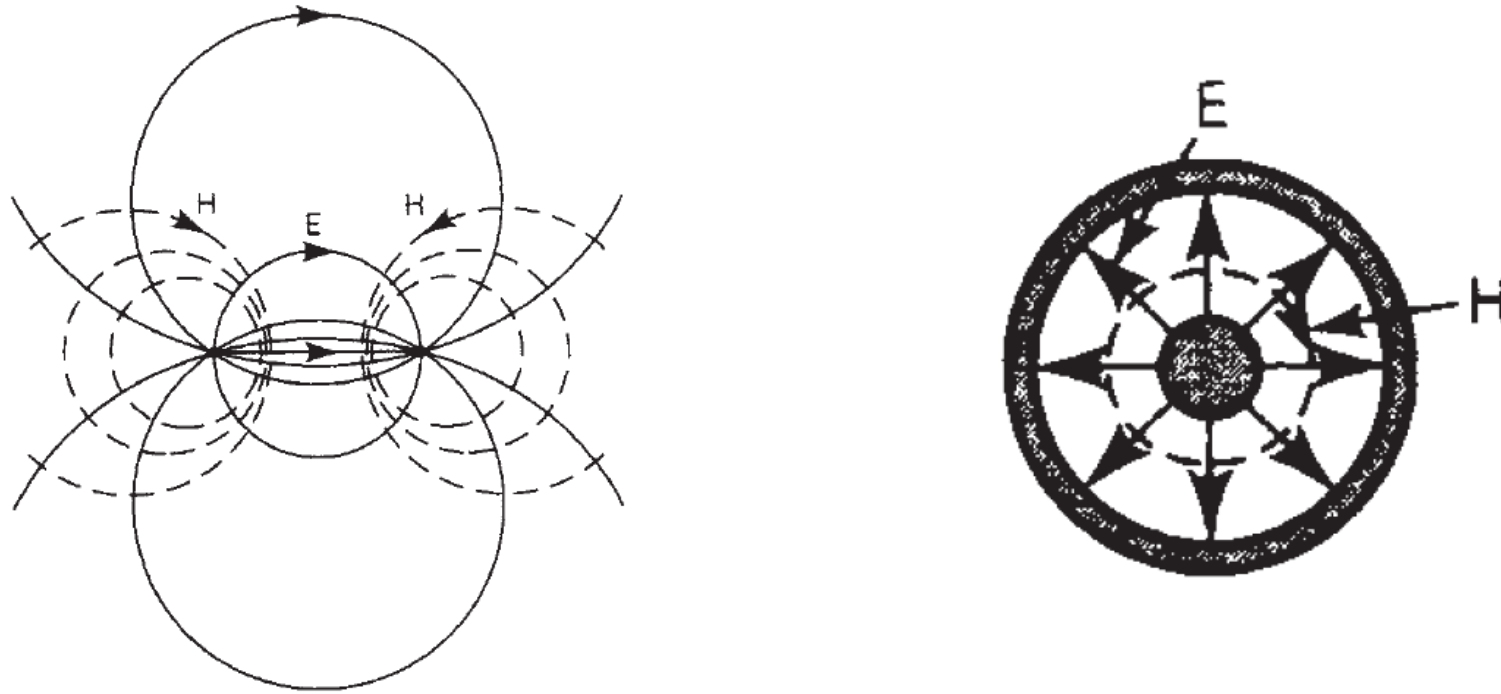


Fig. 1 Cortes transversales de los campos E y H que rodean a una línea de dos alambres paralelos (a) y una coaxial (b)

Características de las ondas electromagnéticas

Velocidad de la onda.

- **Velocidad de la onda.** Las ondas viajan a diversas velocidades que dependen del tipo de onda y de las características del medio de propagación. Las ondas sonoras viajan aproximadamente a 335 m/s en la atmósfera normal. Las ondas electromagnéticas viajan mucho más rápido. En el espacio libre (es decir, en el vacío), las EMT viajan a la velocidad de la luz, $c = 299,793,000$ m/s, que se redondea a 3×10^8 m/s. Sin embargo, en el aire de la atmósfera terrestre, viajan un poco más despacio, y por una línea de transmisión viajan con bastante menor

Frecuencia y longitud de onda

- Las oscilaciones de una onda electromagnética son periódicas y repetitivas. Por consiguiente, se caracterizan por su frecuencia. La rapidez con que se repite la onda periódica es su frecuencia. La distancia de un ciclo en el espacio se llama *longitud de onda*, y se calcula con la siguiente ecuación fundamental

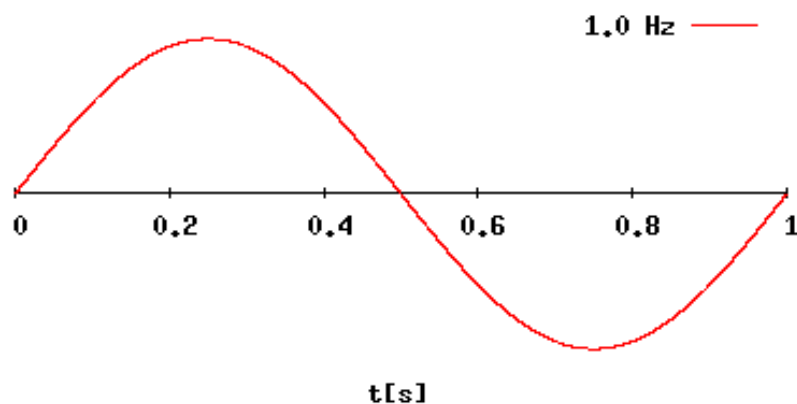


Fig. 1 Relación entre la longitud de la frecuencia y longitud de onda

$$\lambda = \text{velocidad} \times \text{periodo} \\ = v \times T$$

Y como $T = 1/f$,

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

- Si se sustituye el tiempo de un ciclo (un *periodo*) en la ecuación se obtiene la longitud de un ciclo, que se llama longitud de onda, y cuyo símbolo es la letra griega lambda minúscula (λ).

- En la propagación por el espacio vacío $v = c$, y por consiguiente la longitud de un ciclo es

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{f \text{ ciclos/s}} = \frac{\text{metros}}{\text{ciclo}}$$

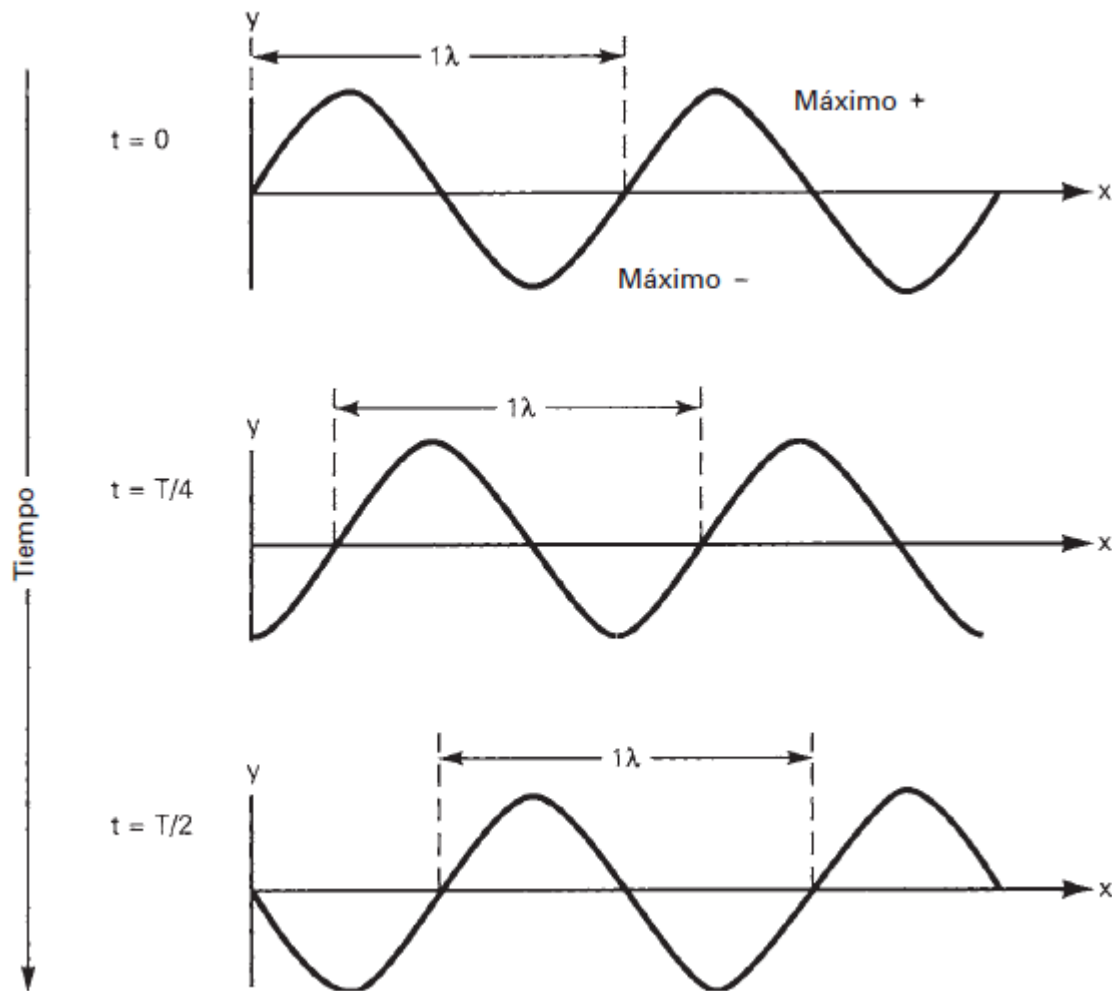
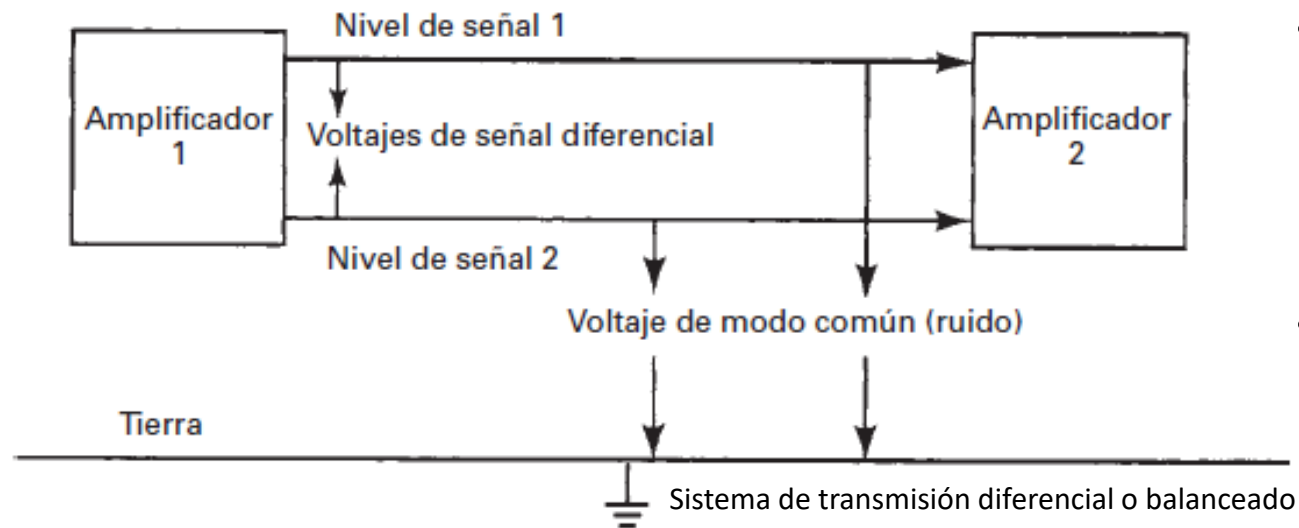


Fig. Desplazamiento y velocidad de una onda transversal al propagarse por una línea de transmisión

- Desplazamiento y la velocidad de una onda transversal cuando se propaga en una línea de transmisión, de una fuente a una carga.
- El eje horizontal (X) es la distancia, y el eje vertical (y) es el desplazamiento. Una longitud de onda es la distancia que ocupa un ciclo de la onda. Se ve que la onda se mueve hacia la derecha, o se propaga por la línea al paso del tiempo.

Tipos de Línea de Transmisión

En general, las líneas de transmisión se pueden clasificar en *balanceadas* y *desbalanceadas*.

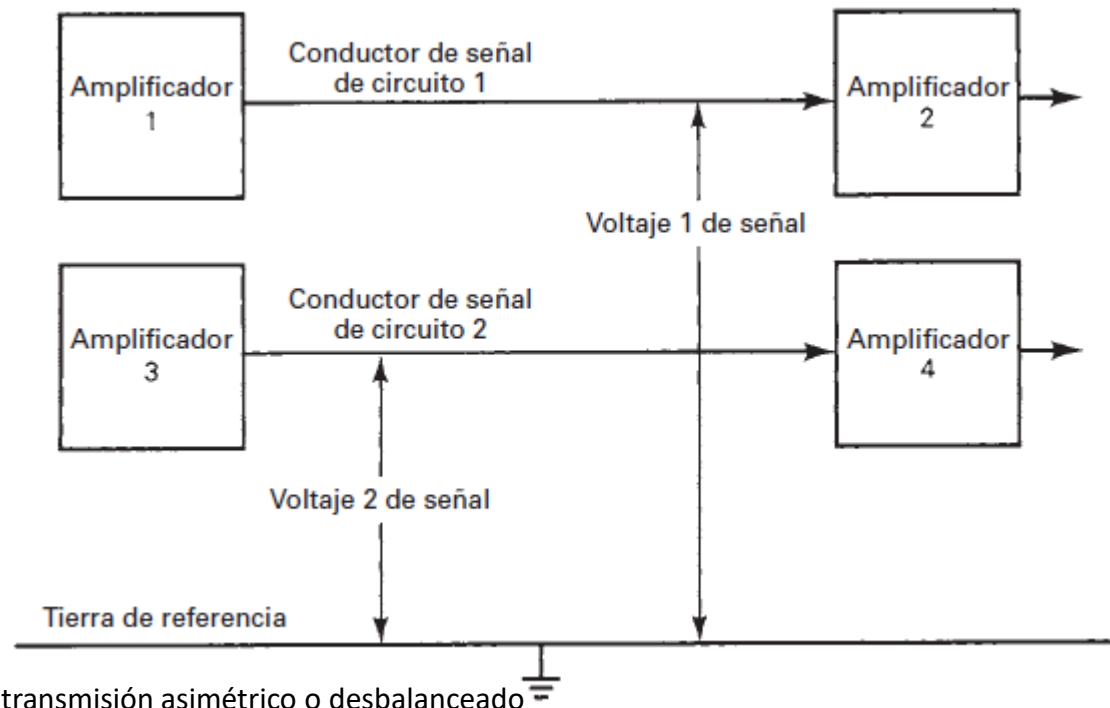


Las corrientes que fluyen en direcciones opuestas en un par balanceado de alambres se llaman **corrientes de circuito metálico**. Las corrientes que tienen las mismas direcciones se llaman **corrientes longitudinales***. Un par balanceado de alambres tiene la ventaja de que la mayor parte del ruido de interferencia

*Estatica

Línea de transmisión balanceada

- Las líneas balanceadas de dos alambres ambos conductores llevan corriente; uno lleva la señal y el otro es el regreso. La señal que se propaga por el alambre se mide como diferencia de potencial entre los dos conductores.
- Todo par de alambres puede trabajar en el modo balanceado, siempre que ninguno de ellos esté al potencial de tierra. Aquí se incluye el cable coaxial que tiene dos conductores centrales y un blindaje. En general, el blindaje se conecta a tierra para evitar que la interferencia estática penetre a los conductores centrales.



Sistema de transmisión asimétrico o desbalanceado

Línea de transmisión desbalanceada

- En una línea de transmisión desbalanceada, un alambre está al potencial de tierra, mientras que el otro tiene el potencial de una señal.
- A este tipo de transmisión se le llama transmisión de señal *desbalanceada* o *asimétrica*. En la transmisión desbalanceada, el alambre de tierra puede ser también la referencia para otros conductores portadores de señal. Si éste es el caso, el alambre de tierra debe ir donde vaya cualquiera de los conductores de señal

La figura muestra dos sistemas desbalanceados de transmisión. La diferencia de potencial en cada alambre de señal se mide entre él y la tierra. Las líneas de transmisión balanceadas se pueden conectar a líneas desbalanceadas, y viceversa, con transformadores especiales llamados **balunes**.

Balun (balanced to unbalanced): Se usa para conectar una línea de transmisión balanceada con una carga desbalanceada

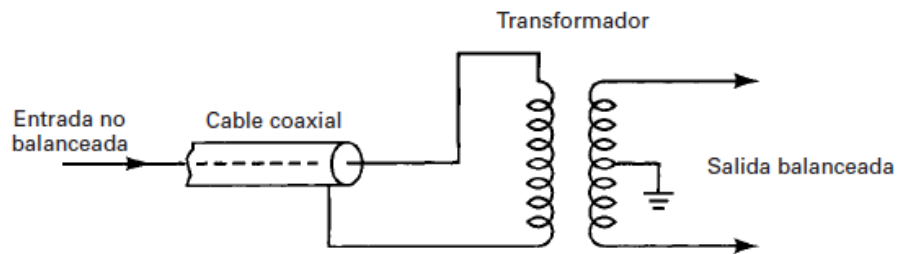


Fig. 1 Balun para frecuencias bajas

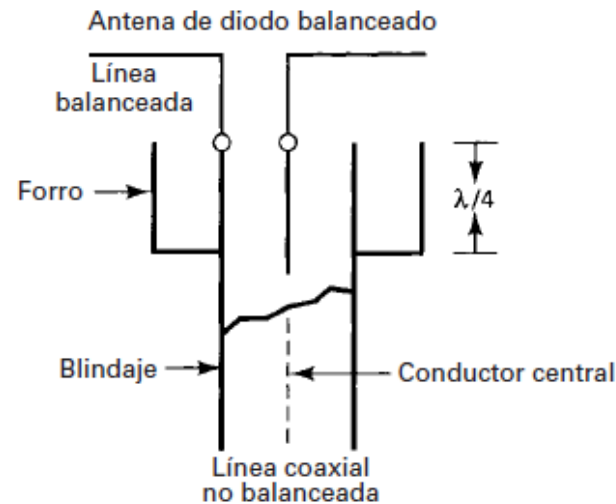


Fig. 2 Balun para frecuencias altas

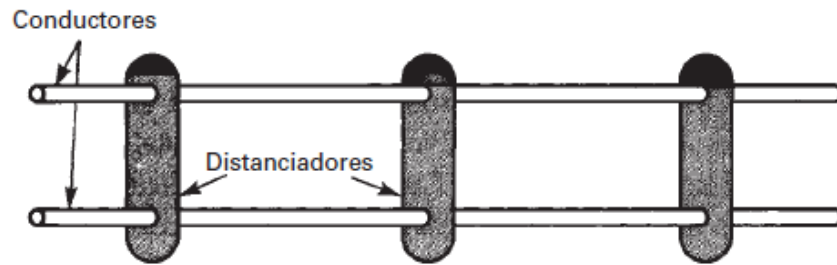
Una línea de transmisión desbalanceada, como un cable coaxial, se puede conectar con una carga balanceada, como una antena, mediante un transformador especial con desbalanceado primario y devanado secundario con toma central.

El balún debe tener un blindaje electrostático conectado a tierra física, para reducir al mínimo los efectos de las capacitancias parásitas.

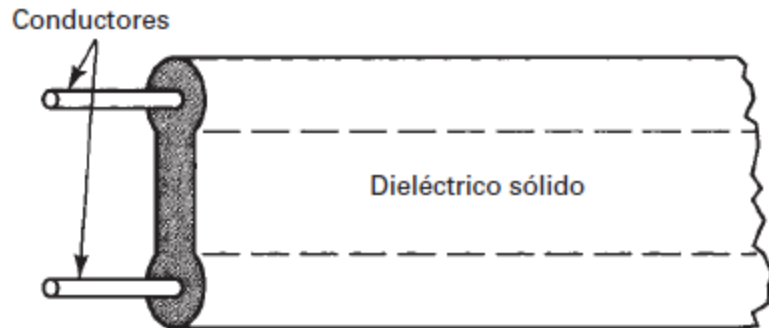
Frecuencias bajas: El conductor externo (*blindaje*) de una línea de transmisión desbalanceada se suele conectar a tierra. A frecuencias relativamente bajas se puede usar un transformador ordinario para aislar la tierra de la carga, como se ve en la figura 1.

Frecuencias altas: Se usan balunes de varios tipos para líneas de transmisión, el más común es el balún de *banda angosta*, que a veces se llama *choke*, *forro* o balún *bazuca*, y se ve en la fig. 8-6b. Un choke de cuarto de onda se instala en torno al conductor externo de un cable coaxial y se conecta con él. Así, la impedancia que se ve hacia la línea de transmisión se forma por el choke y el conductor externo, y es igual a infinito, es decir, el conductor externo ya no tiene impedancia cero a tierra. Por lo anterior, un alambre del par balanceado se puede conectar con el choke sin poner en corto la señal. El segundo conductor se conecta al conductor interno del cable coaxial.

Conductores



(a) Conductores gemelos desnudos



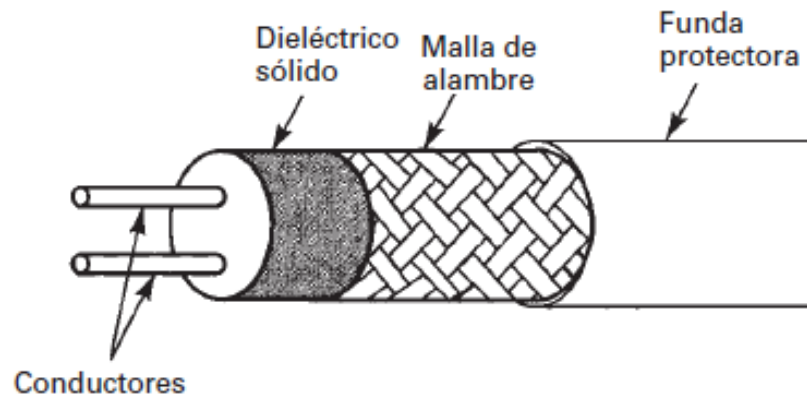
(b) Conductores gemelos

- **Línea de transmisión de alambre desnudo:** Una *línea de transmisión de alambre desnudo* es un conductor de dos alambres paralelos; se ve en la fig. 8-7a. Consiste simplemente en dos alambres paralelos a corta distancia y separados por aire. Se colocan espaciadores no conductores a intervalos periódicos, para sostenerlos y mantener constante la distancia entre ellos
- **Conductores gemelos:** A los conductores gemelos también se les llama con frecuencia *cable de cinta*. Los conductores gemelos son, en esencia, lo mismo que la línea de transmisión de conductores desnudos, pero los distanciadores entre los dos conductores se reemplazan con un dieléctrico macizo continuo. Así se asegura la distancia uniforme a lo largo de todo el cable

Conductores



(a) Par trenzado de cobre



(b) Par de cable blindado.

- **Cable de par trenzado**
- Llevan *núcleos* que a su vez se cubren con varios tipos de *forros*, dependiendo de la aplicación. Los pares vecinos se trenzan con distintos *pasos* (longitud de torcimiento) para reducir la interferencia debida a la inducción mutua entre los pares. Las *constantes primarias* del cable de par trenzado son sus parámetros eléctricos: resistencia, inductancia, capacitancia y conductancia
- **Par de cable blindado.** Está formado por dos **alambres conductores paralelos separados por un material dieléctrico macizo**. Toda la **estructura se encierra en un tubo de conductor integrado por una malla**, y después se cubre con una capa protectora de plástico. reducir las pérdidas por radiación y la interferencia, con frecuencia las líneas de transmisión se encierran en una *malla* de alambre metálica y conductora. La malla se conecta a tierra y funciona como blindaje. También, la malla evita que se irradien señales fuera de ella, y evita que la interferencia electromagnética llegue a los conductores de señal.



Casi siempre el conductor externo de un cable coaxial se conecta a tierra (Grounding Kit), y eso limita su empleo a aplicaciones desbalanceadas o asimétricas.

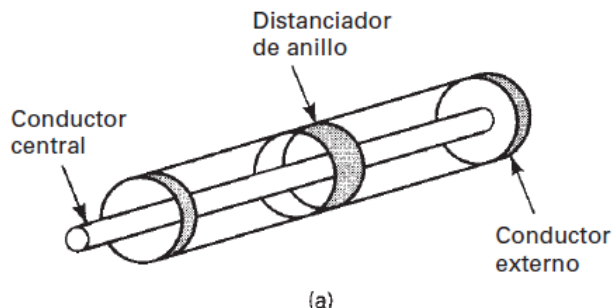


Fig. 1 Líneas de transmisión concéntricas o coaxiales flexible

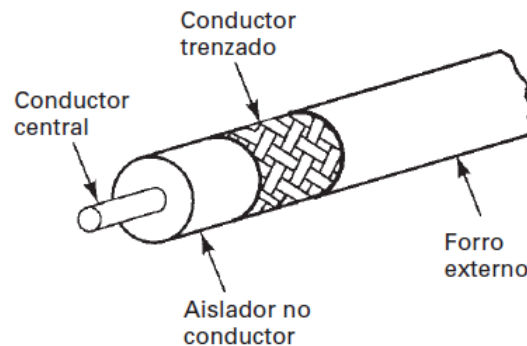
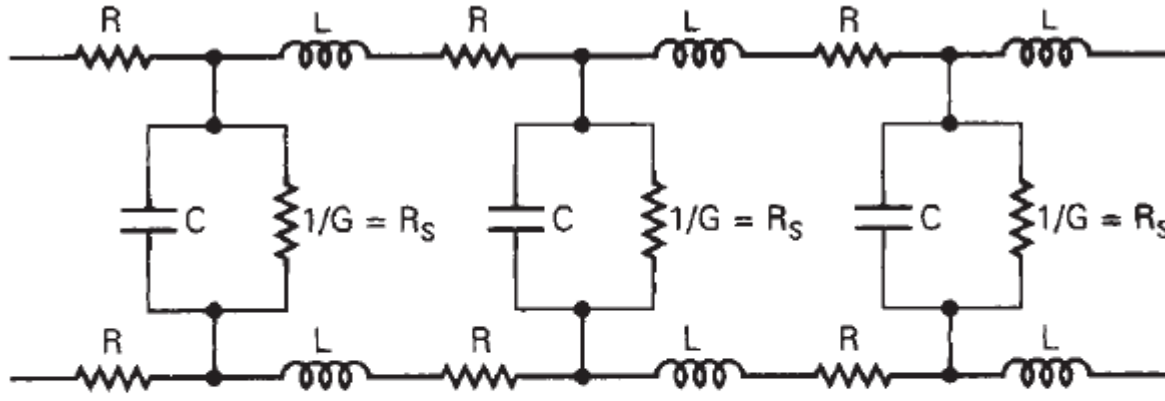


Fig. 2 Líneas de transmisión concéntricas o coaxiales rígida

- **Líneas de transmisión concéntricas o coaxiales:** Sin embargo, con las altas frecuencias aumentan demasiado sus pérdidas por radiación y en dieléctrico, así como su susceptibilidad a la interferencia externa. Por lo anterior, se usan mucho los *conductores coaxiales* en aplicaciones de alta frecuencia, para reducir las pérdidas y para aislar las trayectorias de transmisión. El cable coaxial básico consiste en un conductor central rodeado por un *conductor externo concéntrico*, a distancia uniforme del centro.
- En esencia hay dos tipos de cables coaxiales: ***líneas rígidas llenas de aire*** o ***líneas flexibles macizas***.

Características de transmisión:



C = capacitancia – dos conductores separados por un aislador

R = resistencia – oposición al flujo de corriente

L = inductancia propia

$1/G$ = resistencia de pérdida del dieléctrico

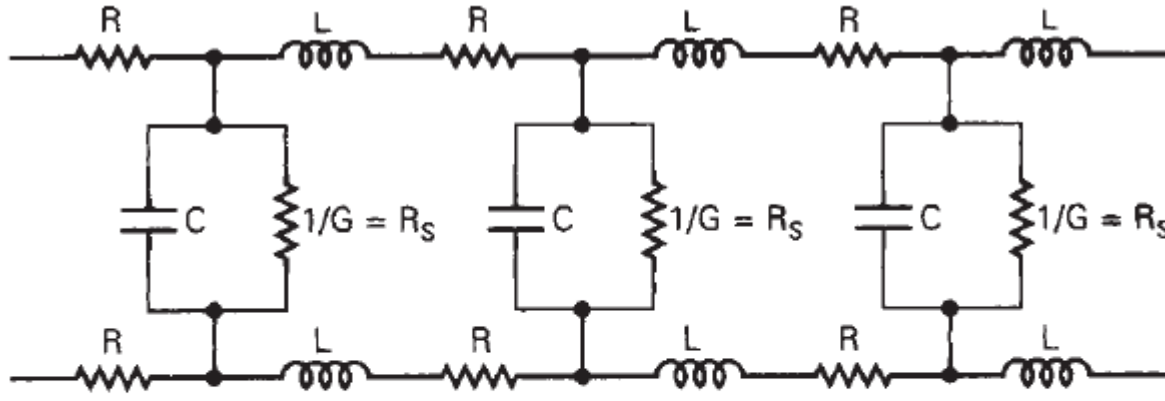
R_s = resistencia de pérdida en paralelo

Fig. 1 Línea de transmisión de dos hilos paralelos; circuito eléctrico equivalente

Las constantes primarias se distribuyen uniformemente en toda la longitud de la línea y, en consecuencia, se les llama **parámetros distribuidos**

- Las características de una línea de transmisión están **determinadas por sus propiedades eléctricas**, como por ejemplo la **conductividad** de los alambres y la **constante dieléctrica** del aislamiento, y de sus **propiedades físicas**, como diámetro del alambre y **distancia entre conductores**.
- Estas propiedades, a su vez, determinan las constantes eléctricas primarias: resistencia de cd en serie (R), inductancia en serie (L), capacitancia en paralelo (C) y conductancia en paralelo (G).

Lineas uniformemente distribuidas



C = capacitancia – dos conductores separados por un aislador

R = resistencia – oposición al flujo de corriente

L = inductancia propia

$1/G$ = resistencia de pérdida del dieléctrico

R_s = resistencia de pérdida en paralelo

Fig. 1 Línea de transmisión de dos hilos paralelos; circuito eléctrico equivalente

Las constantes primarias se distribuyen uniformemente en toda la longitud de la línea y, en consecuencia, se les llama **parámetros distribuidos**

- Las características de una línea de transmisión están **determinadas por sus propiedades eléctricas**, como por ejemplo la **conductividad** de los alambres y la **constante dieléctrica** del aislamiento, y de sus **propiedades físicas**, como diámetro del alambre y **distancia entre conductores**.
- Estas propiedades, a su vez, determinan las constantes eléctricas primarias: resistencia de cd en serie (R), inductancia en serie (L), capacitancia en paralelo (C) y conductancia en paralelo (G).

Impedancia característica

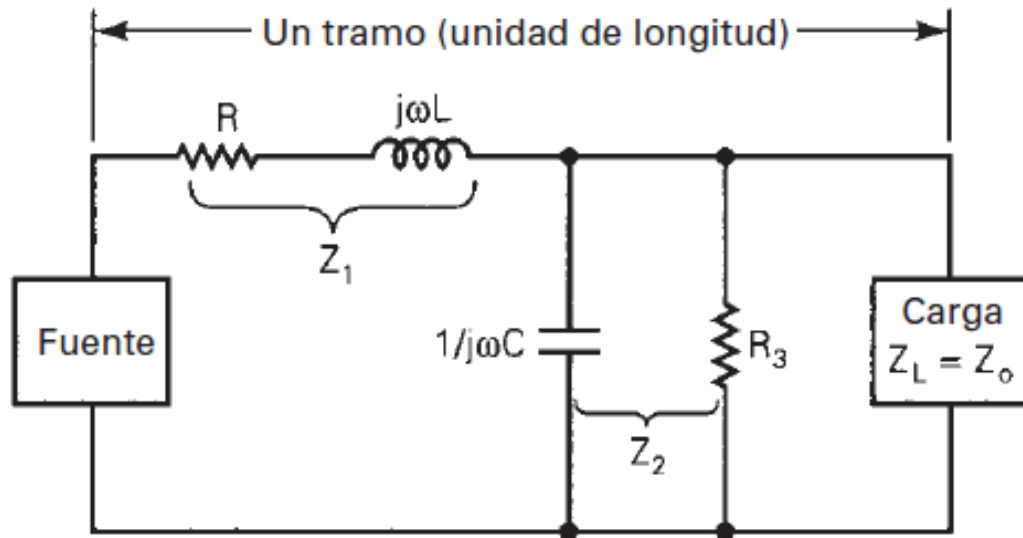


Fig. 1 Circuito equivalente de un solo tramo de línea de transmisión terminada en una carga igual a Z_0 , donde muestra una sola sección de una línea de transmisión terminada en una carga Z_L que es igual a Z_0 . La impedancia que se ve hacia una línea de n de dichas secciones se calcula con la siguiente ecuación

$$Z_o^2 = Z_1 Z_2 + \frac{Z_L^2}{n} \qquad Z_o = \sqrt{(R + j\omega L) \frac{1}{G + j\omega C}}$$

- La impedancia característica, Z_0 , de una línea de transmisión es una cantidad compleja que se expresa en ohms, y que en el caso ideal es independiente de la longitud de la línea y que no se puede medir.
- Para que haya una transferencia máxima de energía de la fuente a la carga, es decir, que no haya energía reflejada, una línea de transmisión debe terminar en una carga puramente resistiva, igual a la *impedancia característica* de ella
- Esa impedancia característica, se define como la impedancia vista hacia una línea de longitud infinita, o la impedancia vista hacia una línea de longitud finita que termina en una carga puramente resistiva igual a la impedancia característica de la línea.

la atmósfera de la Tierra introduce pérdidas de la señal que no se encuentran en el vacío.

Constante de propagación

- Cuando una onda se propaga por una línea de transmisión disminuye su amplitud con la distancia recorrida.
- La *constante de propagación*, que a veces se le llama *coeficiente de propagación* se usa para expresar la atenuación (pérdida de señal) y el desplazamiento de fase por unidad de longitud de una línea de transmisión.
- Por consiguiente, con una línea de longitud infinita, o una que se vea infinitamente larga, como puede ser una línea finita terminada en una carga equilibrada ($Z_0 = Z_L$), no regresa o se refleja energía alguna hacia la fuente

$$\gamma = \alpha + j\beta$$

siendo γ = constante de propagación

α = coeficiente de atenuación (nepers por unidad de longitud)

β = coeficiente de desplazamiento de fase (radianes por unidad de longitud)

La constante de propagación es una cantidad compleja y se define como sigue

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$$

Factor de velocidad

- Las ondas electromagnéticas viajan a la velocidad de la luz cuando se propagan en el vacío, y casi a la velocidad de la luz cuando lo hacen a través del aire. Sin embargo, en las líneas metálicas de transmisión, donde el conductor suele ser cobre, y en los materiales dieléctricos, la velocidad varía mucho de acuerdo

Factor de velocidad

- El *factor de velocidad* (llamado a veces *constante de velocidad*) se define como la relación de la velocidad real de propagación a través de determinado medio, entre la velocidad de propagación a través del espacio vacío. La definición matemática del factor de velocidad es

$$V_f = \frac{V_p}{c}$$

donde V_f = factor de velocidad (adimensional)
 V_p = velocidad real de propagación (metros por segundo)
 c = velocidad de propagación a través del espacio vacío ($c = 3 \times 10^8$ m/s)

Índices de velocidad y constantes dieléctricas

Material	Factor de velocidad
Aire	0.95–0.975
Hule	0.56–0.65
Polietileno	0.66
Teflón	0.70
Espuma de teflón	0.82
Espigas de teflón	0.81
Espiral de teflón	0.81

Tabla. 1 Factores de velocidad

$$V_f \times c = V_p$$

Material	Constante dieléctrica relativa (ϵ_r)
Vacío	1.0
Aire	1.0006
Teflón	2.1
Polietileno (PE)	2.27
Poliestireno	2.5
Papel parafinado	2.5
Hule	3.0
Cloruro de polivinilo (PVC)	3.3
Mica	5.0
Vidrio	7.5

Tabla. 2 Constantes dieléctricas

La velocidad a la que viaja una onda electromagnética por una línea de transmisión depende de la constante dieléctrica del material aislante que separa a los dos conductores. El factor de velocidad se calcula en forma muy aproximada con la fórmula

$$V_f = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

en la que ϵ_r es la constante dieléctrica del material dado (la permitividad del material en relación con la permitividad en el vacío; es la misma relación ϵ/ϵ_0).

Pérdidas en líneas de transmisión

Tanto las pérdidas I^2R como las del dieléctrico son proporcionales a la longitud, con frecuencia se agrupan y se expresan en decibeles de pérdida por unidad de longitud, es decir, dB/m.

Las líneas de transmisión se consideran, con frecuencia, sin pérdidas. Sin embargo, en realidad hay varias formas en las que se pierde la energía en una línea de transmisión. Están las pérdidas en el:

- Conductor
- Radiación
- Calentamiento del dieléctrico
- Acoplamiento
- Efecto de corona.

Para reducir las pérdidas en el conductor no hay más que **acortar la línea de transmisión o usar un alambre de mayor diámetro** (téngase en cuenta que al cambiar el diámetro del alambre también cambia la impedancia característica y, en consecuencia, la corriente).

La oposición adicional tiene ángulo de fase igual a 0° , y en consecuencia es una resistencia, y no una reactancia. Así, la **resistencia en ca del conductor es proporcional a la raíz cuadrada de la frecuencia**. La relación de la resistencia en ca entre la resistencia en cd de un conductor se llama relación de resistencias. Generalmente a mas **100 MHz, se puede eliminar por completo el centro de un conductor**, sin tener absolutamente efecto alguno sobre la pérdida en el conductor o la propagación de la onda electromagnética.

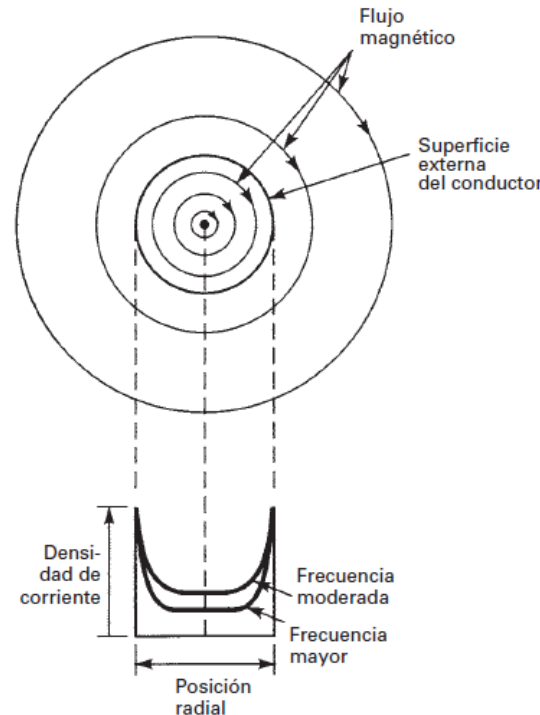


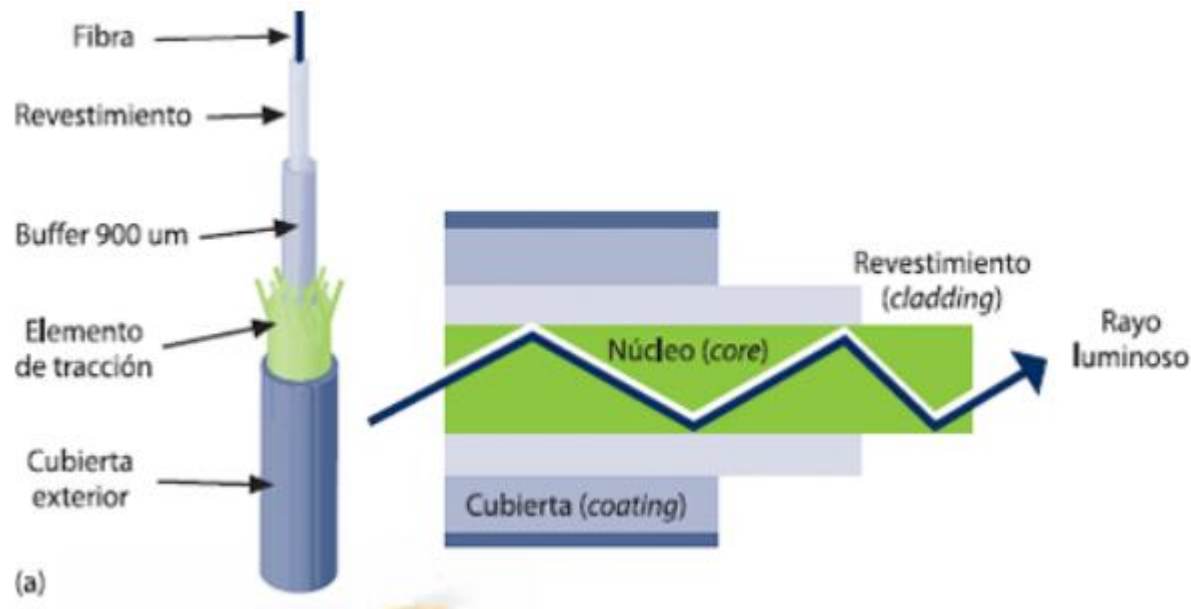
Fig .1. Conductor redondo aislado mostrando las líneas de flujo magnético, distribución de corrientes y el efecto de superficie

- **Pérdidas en el conductor**
- Una línea de transmisión, y ésta tiene una resistencia finita, hay una pérdida inherente e inevitable de potencia.
- A veces a esto se le llama **pérdida en el conductor o pérdida por calentamiento del conductor**, y es tan sólo una pérdida de la forma I^2R .
- Como la resistencia está distribuida en una línea de transmisión, la **pérdida en el conductor es directamente proporcional a la longitud de la línea**. También, ya que la disipación de potencia es directamente **proporcional al cuadrado de la corriente**, la pérdida en el conductor es inversamente proporcional a la impedancia característica

La pérdida en el conductor depende algo de la frecuencia, debido a una acción llamada *efecto de superficie*. Cuando pasa la corriente por un alambre redondo aislado, el flujo magnético asociado con ella tiene la forma de círculos concéntricos

Pérdida por calentamiento del dieléctrico

- Una diferencia de potencial entre los dos conductores de una línea de transmisión causa el *calentamiento del dieléctrico*. El calor es una forma de energía que se debe tener en cuenta cuando se propaga energía por la línea. Para las **líneas con dieléctrico de aire, la pérdida por calentamiento es despreciable**. Sin embargo, con las **líneas rígidas el calentamiento del dieléctrico aumenta con la frecuencia**.

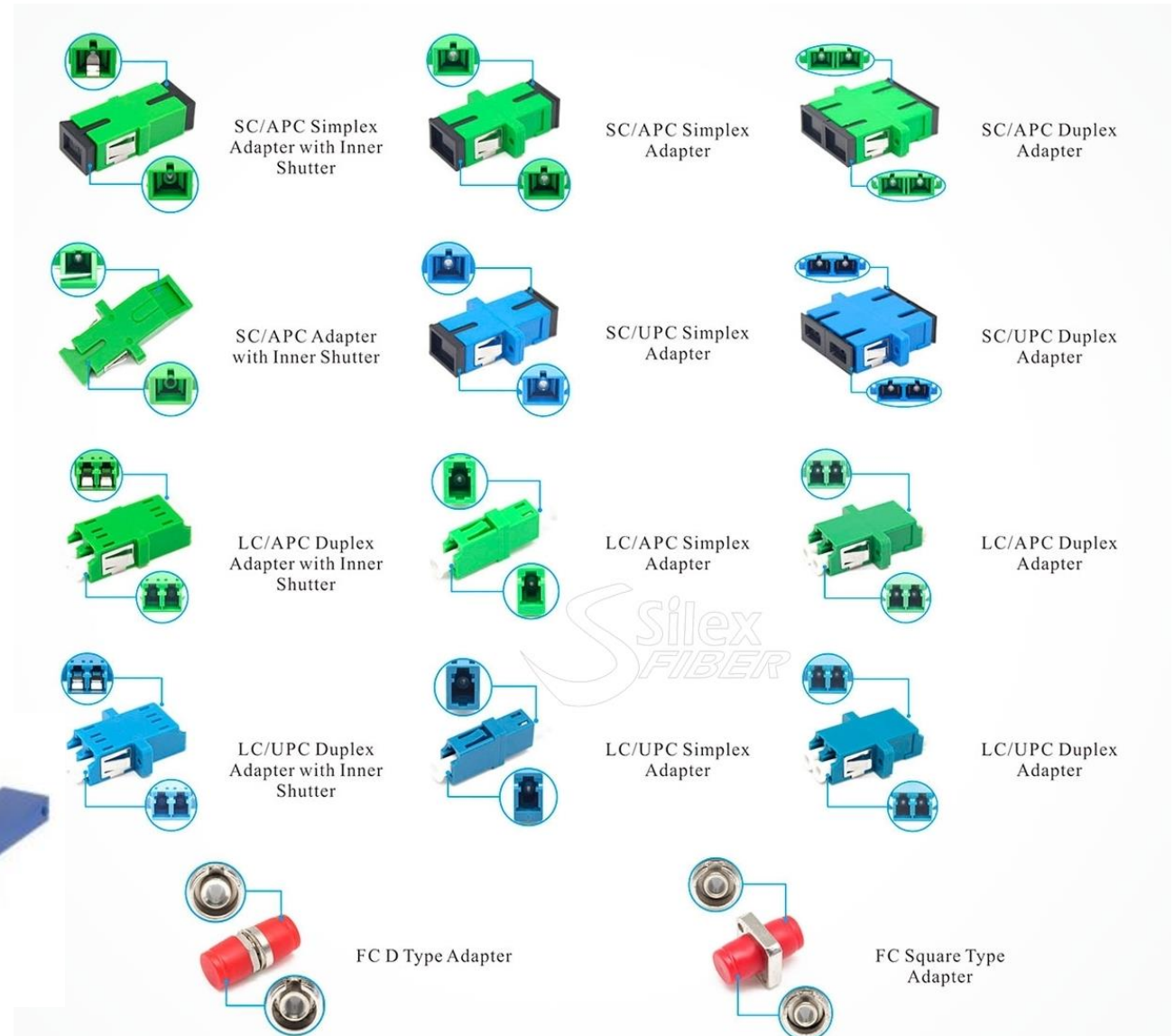


Pérdida por radiación

- Si la separación entre los conductores de una línea de transmisión es una fracción apreciable de una longitud de onda, los campos electrostático y electromagnético que rodean al conductor hacen que la línea funcione como si fuera una antena, y transfiera energía a cualquier material conductor cercano. La **cantidad de energía irradiada depende del material dieléctrico**, la distancia entre conductores y la longitud de la línea.
- Las *pérdidas por radiación* se reducen blindando el cable en forma adecuada. Así, los **cables coaxiales tienen menores pérdidas por radiación que las líneas de dos alambres paralelos**. La pérdida por radiación también es proporcional a la frecuencia.

Pérdida por acoplamiento

- La *pérdida por acoplamiento* se presenta siempre que se hace una conexión con una línea de transmisión, o **cuando se conectan dos tramos separados de línea de transmisión**. Las conexiones mecánicas son discontinuidades, es decir, lugares donde se unen materiales distintos. Las discontinuidades se **tienden a calentar, irradian energía y disipan potencia**.



Efecto corona (o efecto de arco voltaico)

- El *arco voltaico* es una descarga luminosa que se produce entre dos conductores de una línea de transmisión, cuando la diferencia de potencial entre ellos es mayor que el voltaje de *ruptura* del dieléctrico aislante. En general, una vez que se produce el efecto de arco voltaico o efecto corona, la línea de transmisión se destruye.

Fig. 1 Anillo anti corona
Transmisión simuladas

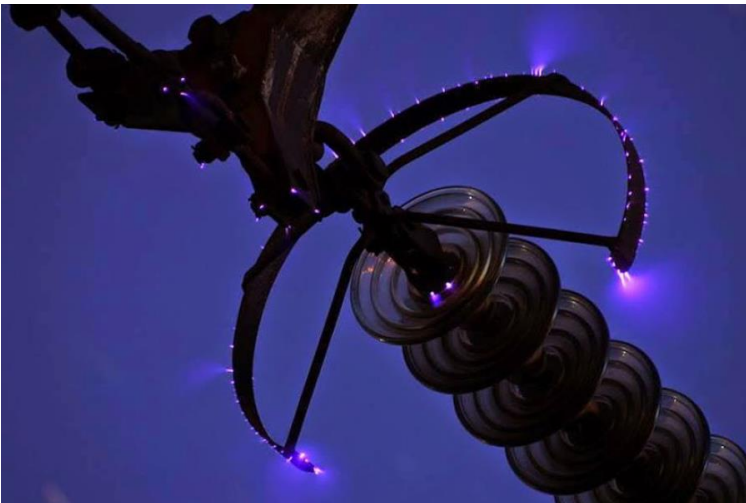
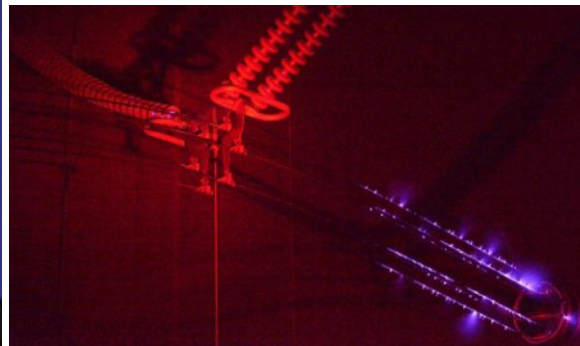


Fig. 2 Efecto corona en Pruebas de Líneas de



¿Cómo minimizar el efecto corona?

El efecto reduce la eficiencia de las líneas de transmisión, de ahí la importancia de minimizar su impacto. Los siguientes factores deben tomarse en cuenta para poder controlarlo:

Diámetro del conductor

Para reducir las pérdidas generadas por el efecto corona, el método de incrementar el diámetro del conductor resulta muy efectivo. Esto puede hacerse usando conductores huecos y con núcleo de acero.

El voltaje de la línea

El voltaje de las líneas de transmisión se fija por consideraciones económicas. Para aumentar el voltaje crítico disruptivo, el espaciado entre los conductores también tiene que incrementarse, aunque este procedimiento tiene algunas limitaciones.

Ondas incidentes y reflejadas

- Una **línea de transmisión ordinaria es bidireccional**: la energía se puede propagar por igual en ambas direcciones. El voltaje que se propaga **desde la fuente hacia la carga se llama *voltaje incidente***, y el que se propaga **de la carga hacia la fuente se llama *voltaje reflejado***. De igual manera hay corrientes incidente y reflejada. En consecuencia, la potencia incidente se propaga hacia la carga, y la potencia reflejada se propaga hacia la fuente.
- El **voltaje y la corriente incidentes siempre están en fase** cuando la impedancia es de carácter resistivo. En una línea infinitamente larga, toda la potencia incidente se almacena en ella, y no hay potencia reflejada.
- También, si la línea se termina en una carga puramente resistiva igual a la impedancia característica de la línea, la carga absorbe toda la potencia incidente (suponiendo que la línea no tenga pérdidas).

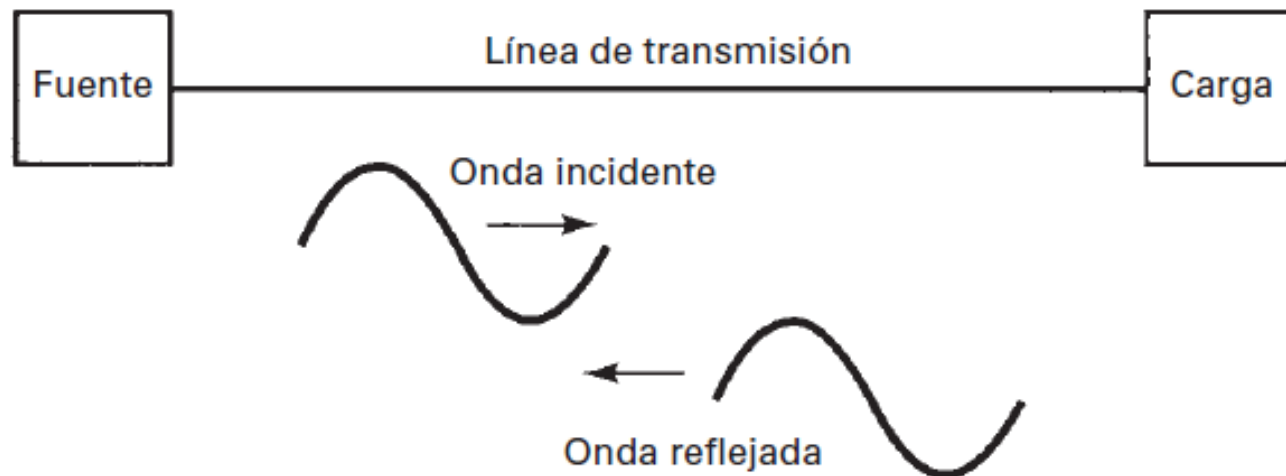


Fig. 1 Fuente, carga, línea de transmisión y sus correspondientes ondas incidente y reflejada

Líneas de transmisión resonantes y no resonantes

- Una línea de transmisión sin potencia reflejada se llama línea *plana* o *no resonante*.
- Una **línea** de transmisión **es no resonante** si su longitud es infinita o si termina en una carga resistiva igual al valor óhmico de su impedancia característica.
- En una **línea resonante**, la energía es transferida en forma alternativa entre los campos magnéticos y eléctricos de la inductancia y la capacitancia distribuida de la línea.

En una línea plana, el voltaje y la corriente son constantes en toda su longitud, si se supone que no tiene pérdidas. Cuando la carga no es igual a la impedancia característica de la línea, algo de la potencia se refleja y va hacia la fuente.

Si la carga es un circuito cerrado o abierto, toda la potencia incidente se refleja hacia la fuente.

Si se sustituyera la fuente por una abertura y un corto y la línea fuera sin pérdidas, la energía presente en ella se reflejaría de un lado a otro (oscilaría) entre los extremos de la fuente y la carga, de modo parecido a cuando la energía va y viene entre el capacitor y el inductor de un circuito tanque *LC*. A esto se le llama línea de transmisión *resonante*

Fig. 1 Fuente, carga, línea de transmisión y sus correspondientes ondas incidente y reflejada

Coeficiente de reflexión

- El *coeficiente de reflexión* es una **cantidad vectorial que representa la relación del voltaje reflejado entre el voltaje incidente**, o la corriente reflejada entre la corriente incidente.
- La definición matemática del coeficiente de reflexión, representado por la gamma mayúscula Γ , es

$$\Gamma = \frac{E_r}{E_i} \text{ o } \frac{I_r}{I_i}$$

siendo Γ = coeficiente de reflexión (adimensional)

E_i = voltaje incidente (volts)

E_r = voltaje reflejado (volts)

I_i = corriente incidente (amps)

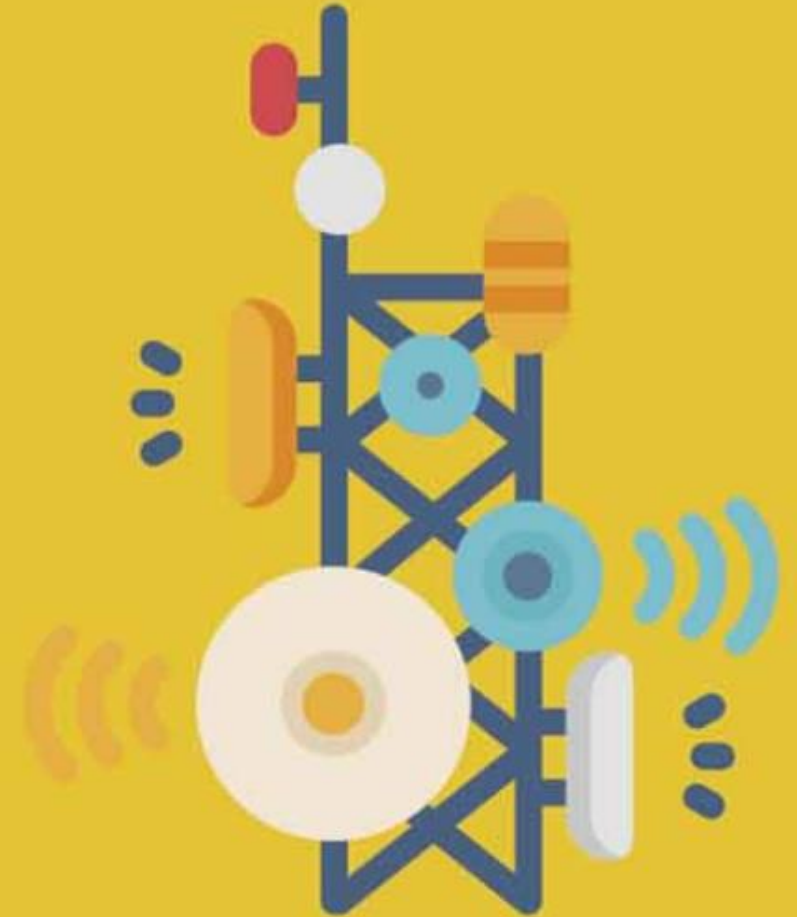
I_r = corriente reflejada (amps)

En la ecuación 8-24 se ve que el valor máximo, y el peor de los casos para $\Gamma = 1$, cuando $E_r = E_i$ y el valor mínimo, y de condición ideal, es cuando $\Gamma = 0$ ($E_r = 0$).

Medios de transmisión electromagnéticos

- Introducción
- Polarización, rayos y frentes de onda
- Ley del cuadrado inverso
- Densidad de campo y flujo de potencia
- Propiedades de la ondas electromagnéticas
- Ondas longitudinales, transversales

Telecomunicaciones



Propagación de las ondas electromagnéticas

- En las clases anteriores se describieron las ondas electromagnéticas transversales (TEM, por *transverse electromagnetic*) y también se describió cómo los conductores metálicos se pueden usar como medio de transmisión para transferir las ondas TEM de uno a otro punto.

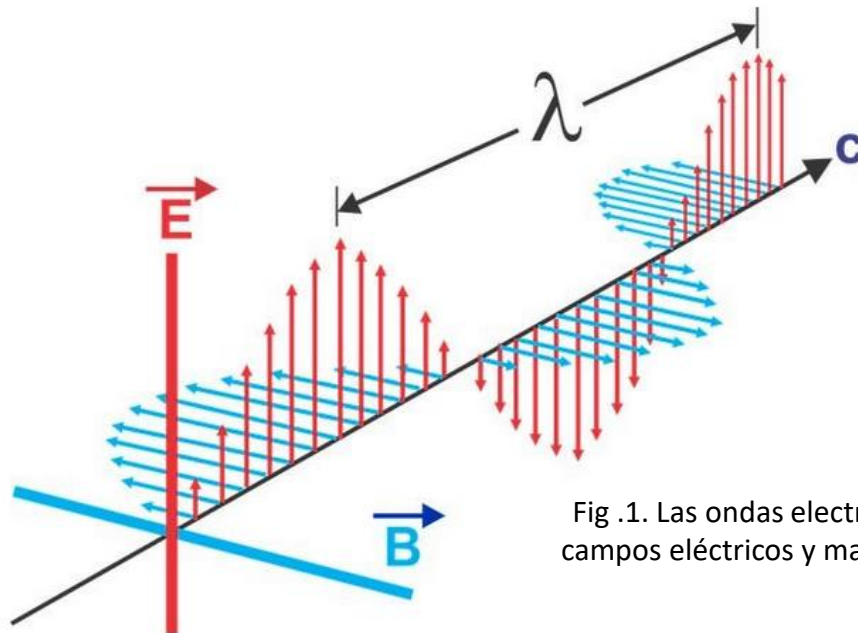


Fig .1. Las ondas electromagnéticas constan de campos eléctricos y magnéticos perpendiculares

- Cuando los transmisores o receptores son móviles, como por ejemplo, en las radiocomunicaciones en dos sentidos y en los teléfonos móviles, es imposible tener conexiones con instalaciones metálicas. En consecuencia, se suele usar el espacio libre o la atmósfera terrestre como medio de transmisión.
- La propagación de las ondas electromagnéticas por el *espacio libre* se suele llamar *propagación de radiofrecuencia* (RF), o simplemente *radio propagación*
- Las ondas de radio son ondas electromagnéticas y, como la luz, se propagan a través del espacio libre en línea recta y con velocidad de 300,000,000 metros por segundo
- Otras formas de ondas electromagnéticas son los rayos infrarrojos, los ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma.

La atmósfera de la Tierra introduce pérdidas de la señal que no se encuentran en el vacío.

Propagación de las ondas electromagnéticas

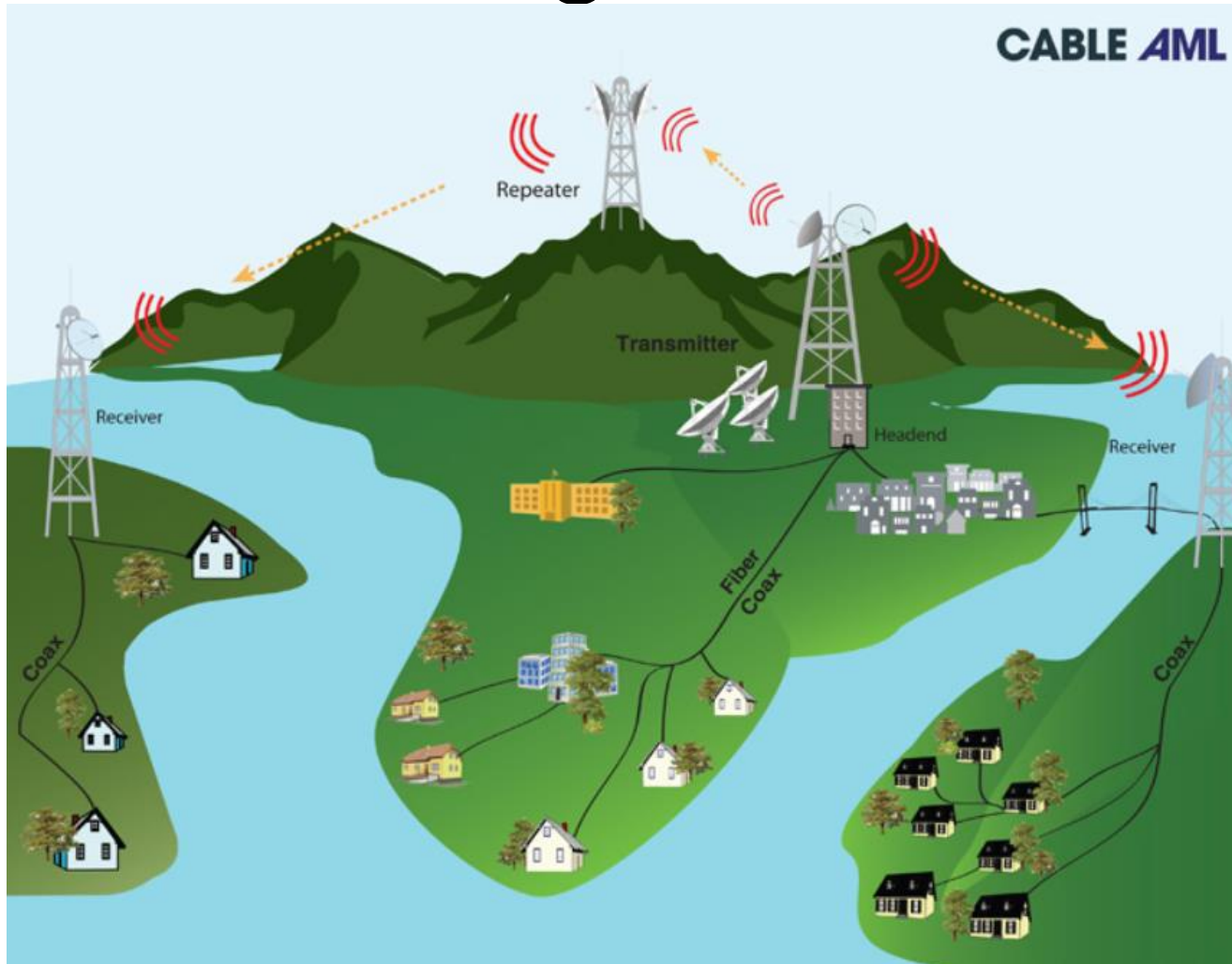
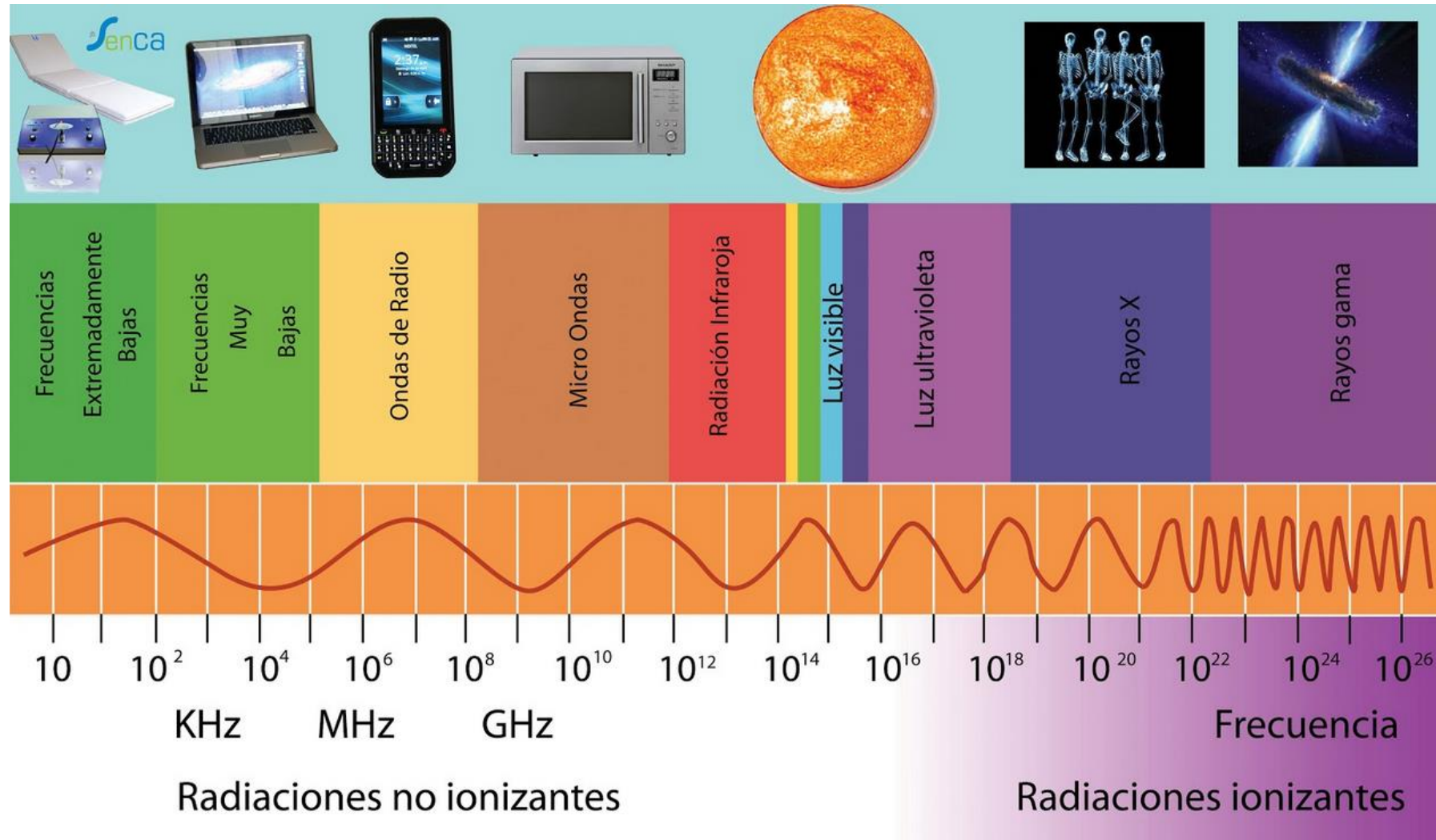


Fig .1. Sistema de telecomunicaciones

- Otras formas de ondas electromagnéticas son los rayos infrarrojos, los ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma.
- Sin embargo, en los sistemas electrónicos de comunicaciones con frecuencia es impráctico o imposible interconectar dos equipos con una instalación física, como un hilo o cable metálico. Esto es válido en especial cuando los equipos están separados por grandes trechos de agua, escarpadas montañas o inhóspitos desiertos, o al comunicarse con transpondedores satelitales, en órbita a 22,000 millas sobre la Tierra.
- También, cuando los transmisores o receptores son móviles, como por ejemplo, en las radiocomunicaciones en dos sentidos y en los teléfonos móviles, es imposible tener conexiones con instalaciones metálicas

Propagación de las ondas electromagnéticas



Polarización electromagnética

- Una onda electromagnética contiene un campo eléctrico y uno magnético, que forman 90° entre sí. La *polarización* de una onda electromagnética plana no es más que la orientación del vector de campo eléctrico con respecto a la superficie de la Tierra, es decir, respecto al horizonte.

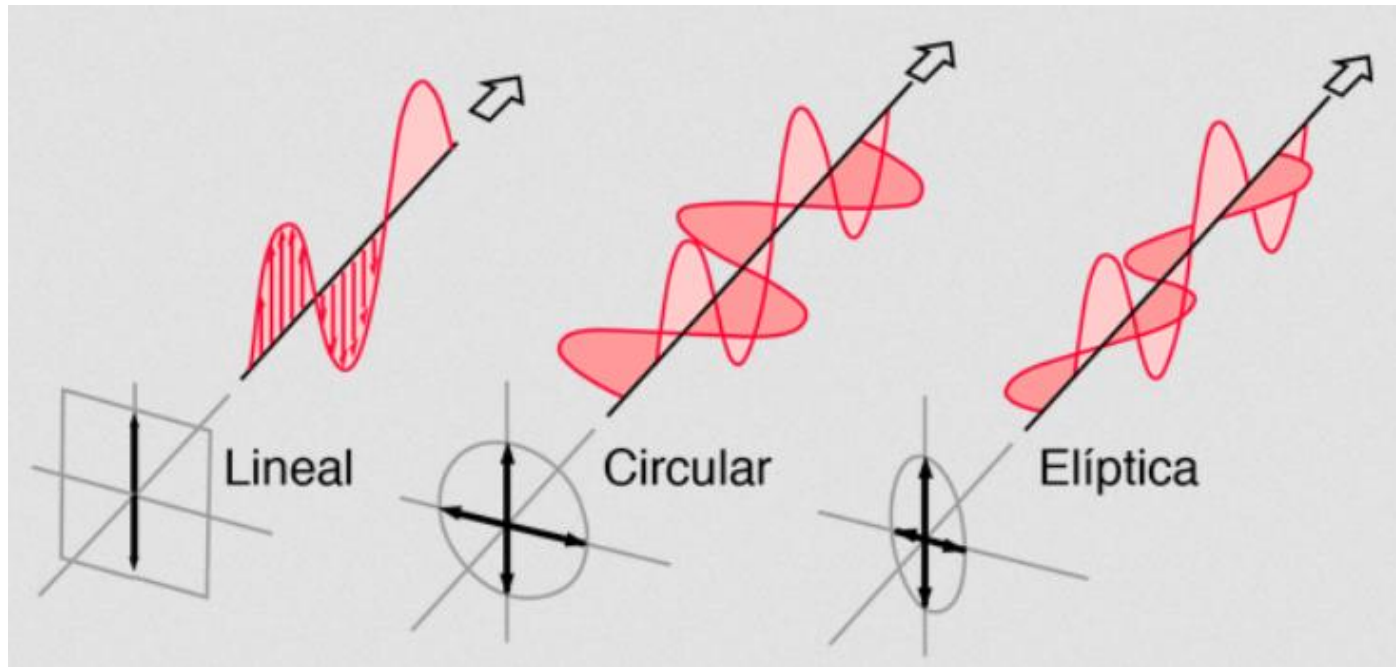


Fig .1. Tipos de polarizaciones

- La *polarización horizontal* y la *polarización vertical* son dos formas de polarización lineal.
- Si el campo eléctrico se propaga en dirección paralela a la superficie terrestre, se dice que la onda está **polarizada horizontalmente**.
- Si el campo eléctrico se propaga en dirección perpendicular a la superficie terrestre, se dice que la onda está **polarizada verticalmente**.
- Si el vector de polarización gira 360° a medida que la onda recorre una longitud de onda por el espacio, y la intensidad de campo es igual en todos los ángulos de polarización, se dice que la onda tiene **polarización circular**.

Si la polarización permanece constante se llama *polarización lineal*

Polarización electromagnética

- Una onda rotatoria puede girar en cualquier dirección. Si el vector gira en dirección de las manecillas del reloj (\odot), es derecho, y si gira en dirección contraria (\otimes), se considera izquierdo.

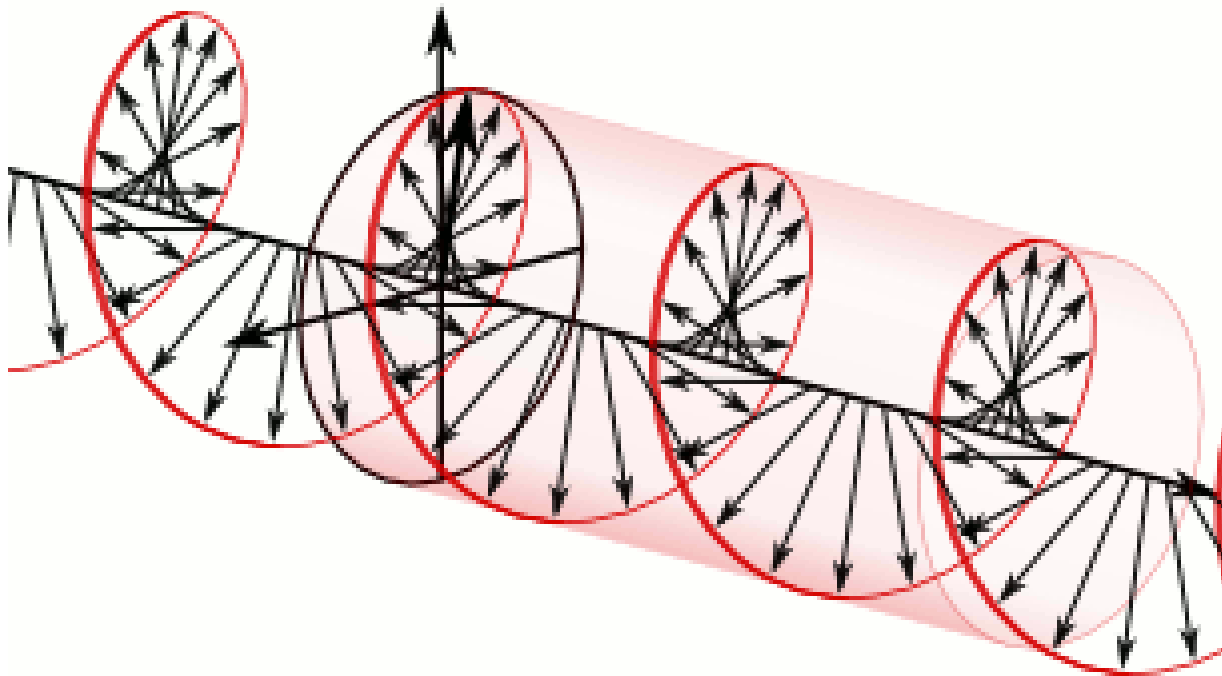


Fig .1. Tipos de polarizaciones

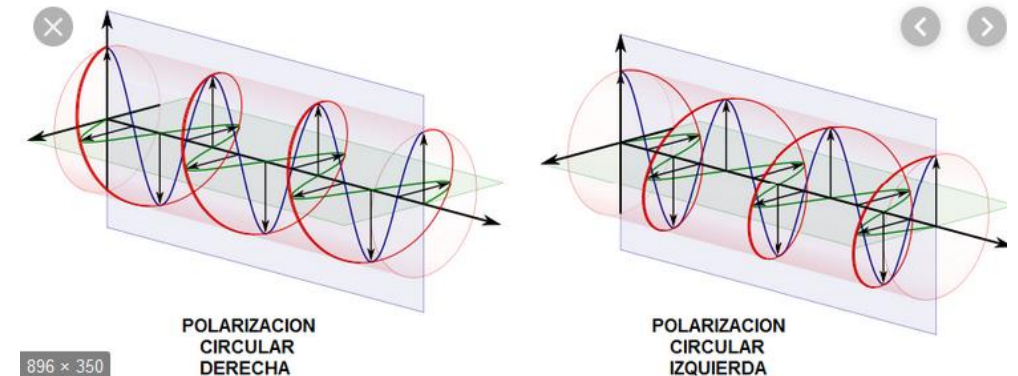


Fig 2,3 Polarización Circular derecha y Polarización circular izquierda

Rayos y frentes de onda

- Las ondas electromagnéticas son invisibles y, en consecuencia, se deben analizar con métodos indirectos, mediante esquemas. Los conceptos de *rayos* y de *frentes de onda* son auxiliares para ilustrar los efectos de la propagación de ondas electromagnéticas a través del espacio vacío. Un rayo es una línea trazada a lo largo de la dirección de propagación de una onda electromagnética.
- Los rayos se usan para mostrar la dirección relativa de la propagación de la onda electromagnética; sin embargo, no necesariamente representan la propagación de una sola onda electromagnética

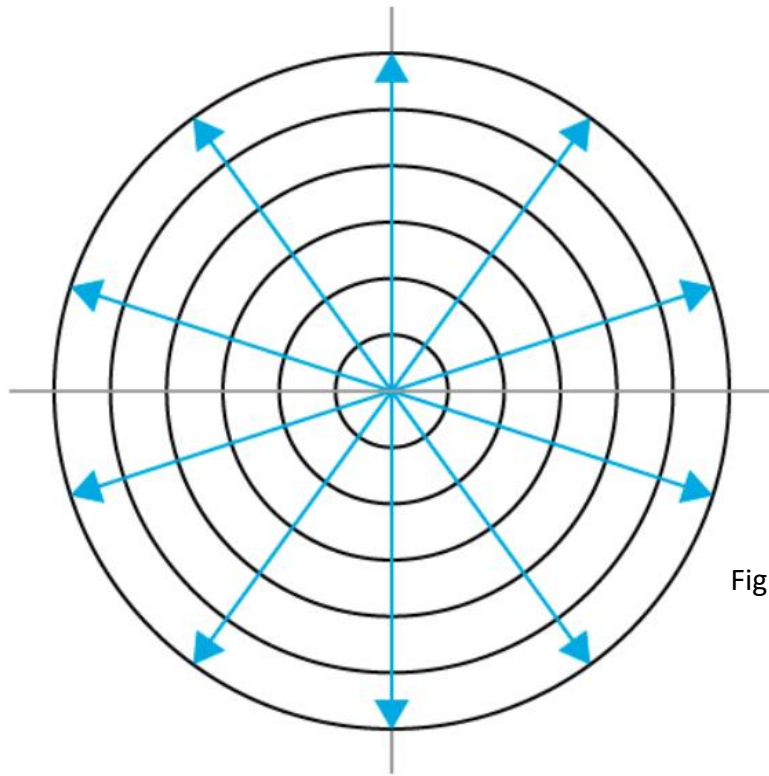


Fig .1. Frente de onda producido por una fuente puntual

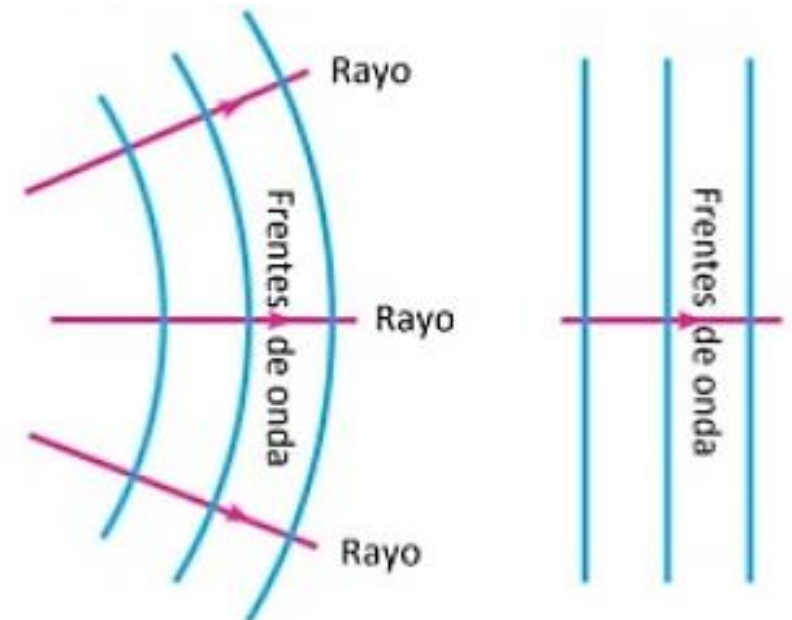
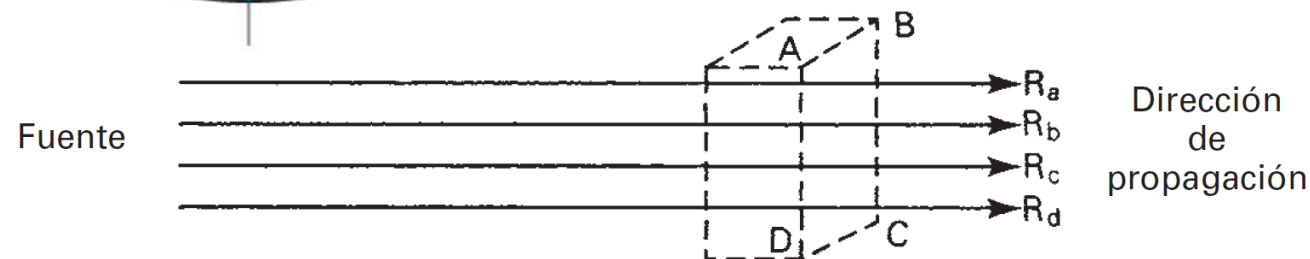


Fig .2, 3. Izq. Rayos, frentes de Onda

Radiación electromagnética

- **Densidad de potencia e intensidad de campo**



Fig .1. Tipos de polarizaciones

- Las ondas electromagnéticas representan el flujo de energía en la dirección de propagación. La rapidez con que la energía pasa a través de una superficie dada en el espacio libre se llama *densidad de potencia*.
- Por consiguiente, la **densidad de potencia es la energía por unidad de tiempo y por unidad de área**, y se suele expresar en watts por metro cuadrado.
- La ***intensidad de campo*** es la intensidad de los campos eléctrico y magnético de una onda electromagnética que se propaga por el espacio libre.
- La intensidad del campo eléctrico se suele expresar en volts por metro, y la del campo magnético en amperes por metro (A/m). La densidad de potencia es:

$$\mathcal{P} = \mathcal{E}\mathcal{H} \quad \text{W/m}^2$$

siendo \mathcal{P} = densidad de potencia (watts por metro cuadrado)

\mathcal{E} = intensidad rms del campo eléctrico (volts por metro)

\mathcal{H} = intensidad rms del campo magnético (amperes por metro)

Medición de radiación no ionizante regional tarija –potosí -chuquisaca

Lugar de Medición: Plaza Sucre, Ciudad de Tarija

Fecha de medición: 31/10/2019

Coordenadas: 21° 32' 7,97" S 64°43' 55,72" W

RESULTADO POR BANDA

AUTORIDAD DE REGULACIÓN Y FISCALIZACIÓN
DE TELECOMUNICACIONES Y TRANSPORTES

Banda	Rango de frecuencia (MHz)	Servicio	Valor Máximo mW/cm ²	Densidad de Potencia mW/cm ²	% Respecto a los límites permitidos
Banda I	0,3 - 1,34	AM	100	3,022E-07	0,0000003%
Banda II	1,34 - 30	AM, OC (SW)	0,2	1,867E-07	0,0000165%
Banda III	30 -300	FM,TV, Radio Móvil	0,2	0,000008784	0,0051792%
Banda IV	300 -1500	TV, Telefonía Móvil	1	0,0002888	0,0416750%
Banda V	1500 - 3000	Telefonía Móvil WAS	1	0,0005054	0,0306350%

Lugar de Medición: Plaza Sucre, Ciudad de Tarija

Fecha de medición: 31/10/2019

Coordenadas: 21° 32' 7,97" S 64°43' 55,72" W

Cuadro Comparativo: Límites establecidos de Densidad de Potencia y Rangos de Valores medidos .

AUTORIDAD DE REGULACIÓN Y FISCALIZACIÓN
DE TELECOMUNICACIONES Y TRANSPORTES

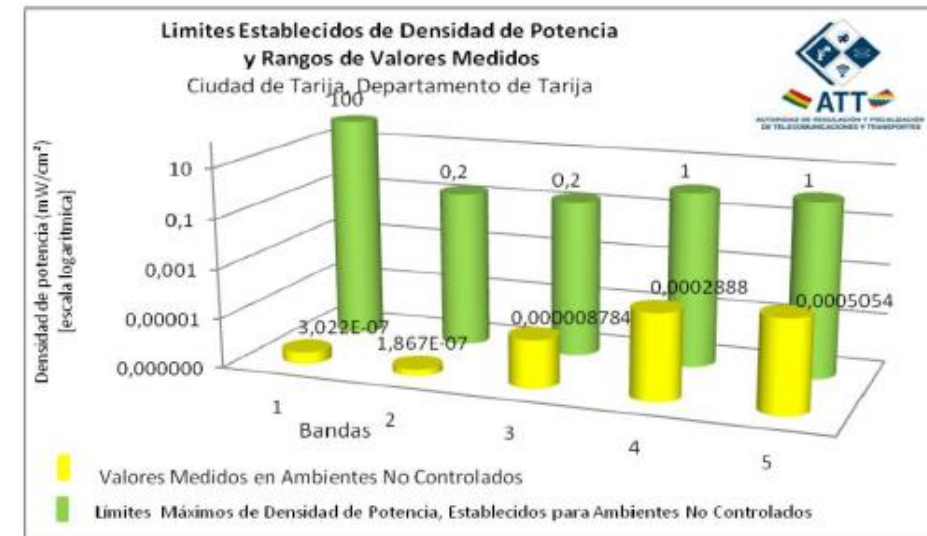


Fig .1. Tipos de polarizaciones

Impedancia característica del espacio libre

- Las intensidades del campo eléctrico y magnético de una onda electromagnética en el espacio libre se relacionan a través de la impedancia característica (resistencia) del espacio vacío. La impedancia característica de un medio de transmisión sin pérdidas es igual a la raíz cuadrada de la relación de su permeabilidad magnética entre su permitividad eléctrica. La ecuación de la impedancia característica del espacio libre, Z_s , es

$$Z_s = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$$

en la que Z_s = impedancia característica del espacio libre (ohms)
 μ_0 = permeabilidad magnética del espacio libre, 1.26×10^{-6} H/m
 ϵ_0 = permitividad eléctrica del espacio libre, 8.85×10^{-12} F/m

Al sustituir valores en la ecuación 9-2, se obtiene

$$Z_s = \sqrt{\frac{1.26 \times 10^{-6}}{8.85 \times 10^{-12}}} = 377 \, \Omega$$

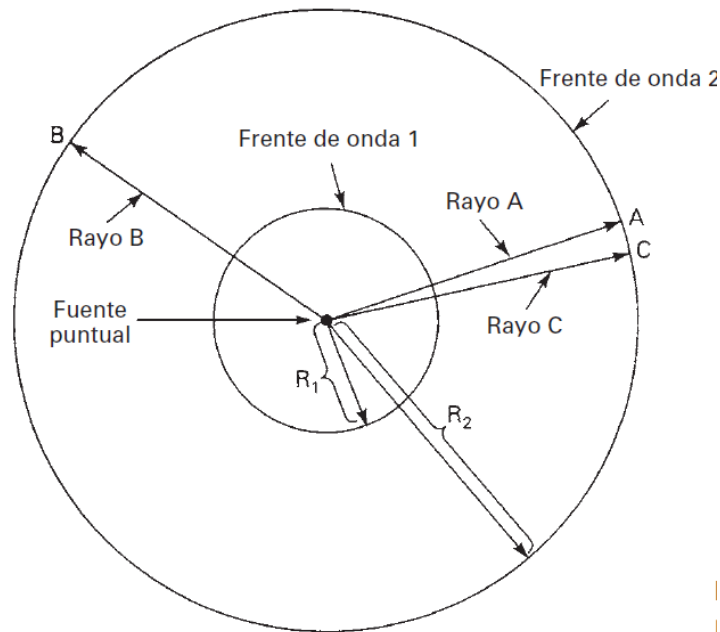
Por consiguiente, al aplicar la ley de Ohm se obtienen

$$\mathcal{P} = \frac{\mathcal{E}^2}{377} = 377 \mathcal{H}^2 \quad \text{W/m}^2$$

$$\mathcal{H} = \frac{\mathcal{E}}{377} \quad \text{A/m}$$

Frente de onda esférico y la ley del cuadrado inverso

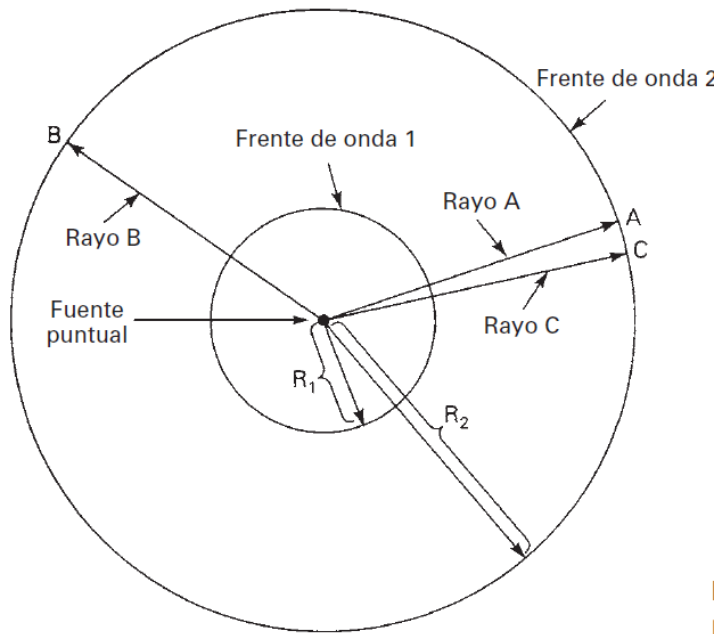
- **Frente de onda esférico**
- La fig. 1 muestra una fuente puntual que irradia potencia a una tasa constante y uniformemente en todas direcciones. Esa fuente se llama **radiador isotrópico**



- No existe un radiador realmente isotrópico; sin embargo, se puede aproximar a una *antena omnidireccional*. Un **radiador isotrópico produce un frente de onda esférico cuyo radio es R** . Todos los puntos que están a la distancia R de la fuente están en la superficie de una esfera, y tienen igual densidad de potencia.
- Por ejemplo, en la fig. 9-3, los puntos A y B están a igual distancia de la fuente. En consecuencia, las densidades de potencia en ellos son iguales. En cualquier momento, la potencia irradiada,
- P_r watts, está uniformemente distribuida sobre la superficie total de la esfera (se supone que el medio de transmisión no tiene pérdidas).
- Así, la densidad de potencia en cualquier punto de la esfera es la potencia total irradiada dividida entre el área total de la esfera. La ecuación que expresa la densidad de potencia en cualquier punto de la superficie de un frente de onda esférico es

Fig .1. Frente de onda esférico producido por una fuente isotrópica

Frente de onda esférico y la ley del cuadrado inverso



$$\mathcal{P} = \frac{P_{rad}}{4\pi R^2} \quad (9-5)$$

en donde P_{rad} = potencia total irradiada (watts)

R = radio de la esfera, que es igual a la distancia de cualquier punto de la superficie de la esfera a la fuente

$4\pi R^2$ = área de la esfera

y para una distancia R_a metros de la fuente, la densidad de potencia es

$$\mathcal{P}_a = \frac{P_{rad}}{4\pi R_a^2}$$

Se igualan las ecuaciones 9-3 y 9-5 para obtener

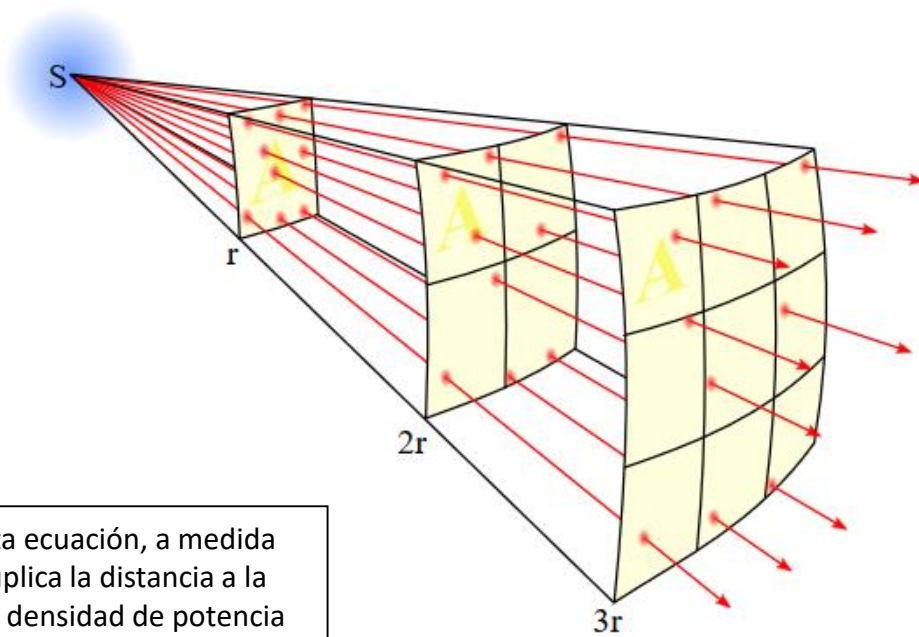
$$\frac{P_{rad}}{4\pi R^2} = \frac{\mathcal{E}^2}{377}$$

Por consiguiente,

$$\mathcal{E}^2 = \frac{377 P_{rad}}{4\pi R^2} \quad \text{y} \quad \mathcal{E} = \frac{\sqrt{30 P_{rad}}}{R} \quad (9-6)$$

Fig. .1. Frente de onda esférico producido por una fuente isotrópica

Ley del cuadrado inverso



Según esta ecuación, a medida que se duplica la distancia a la fuente, la densidad de potencia decrece en un factor de 2^2 , o 4. Cuando se dedujo la ley del cuadrado inverso de la radiación, (ver ecuación), se supuso que la fuente irradia isotrópicamente, aunque eso no es necesario; sin embargo, sí es necesario que la velocidad de propagación en todas direcciones sea uniforme. A un medio de propagación con estas propiedades se le llama **medio isotrópico**

y la densidad de potencia en cualquier punto de la esfera interior es

$$\mathcal{P}_2 = \frac{P_{rad}}{4\pi R_2^2}$$

$$\mathcal{P}_1 = \frac{P_{rad}}{4\pi R_1^2}$$

Por consiguiente,

$$\frac{\mathcal{P}_2}{\mathcal{P}_1} = \frac{P_{rad}/4\pi R_2^2}{P_{rad}/4\pi R_1^2} = \frac{R_1^2}{R_2^2} = \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2$$

Fig .1. Tipos de polarizaciones

- Cuanto más lejos va el frente de onda respecto a la fuente, la densidad de potencia es más pequeña: R_a y R_c se alejan entre sí.
- La potencia total distribuida en la superficie de la esfera queda igual.
- Sin embargo, **como el área de la esfera aumenta en proporción directa a la distancia a la fuente elevada al cuadrado**, es decir, al radio de la esfera al cuadrado, la densidad de potencia es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de la fuente.
- **A esta relación se le llama ley del cuadrado inverso.** Entonces, la densidad de potencia en cualquier punto de la superficie de la esfera exterior es