

2

PROPIEDADES DE LA ONDA ELECTROMAGNÉTICA



Manual de clases

Objetivo

- Describir la naturaleza y el comportamiento de las ondas de radio y los mecanismos de propagación en el espacio libre.

Última modificación:
21 de octubre de 2020

Tema 2 de:
COMUNICACIÓN POR RADIO
Edison Coimbra G.

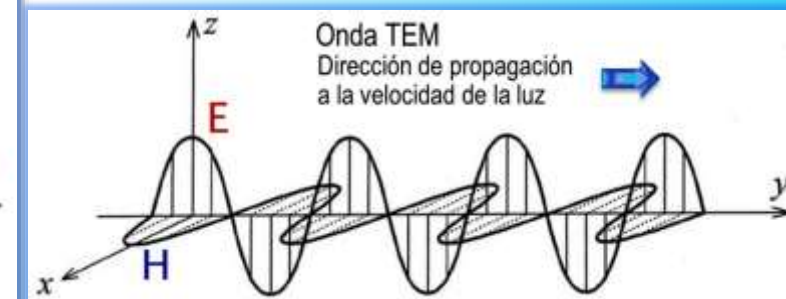
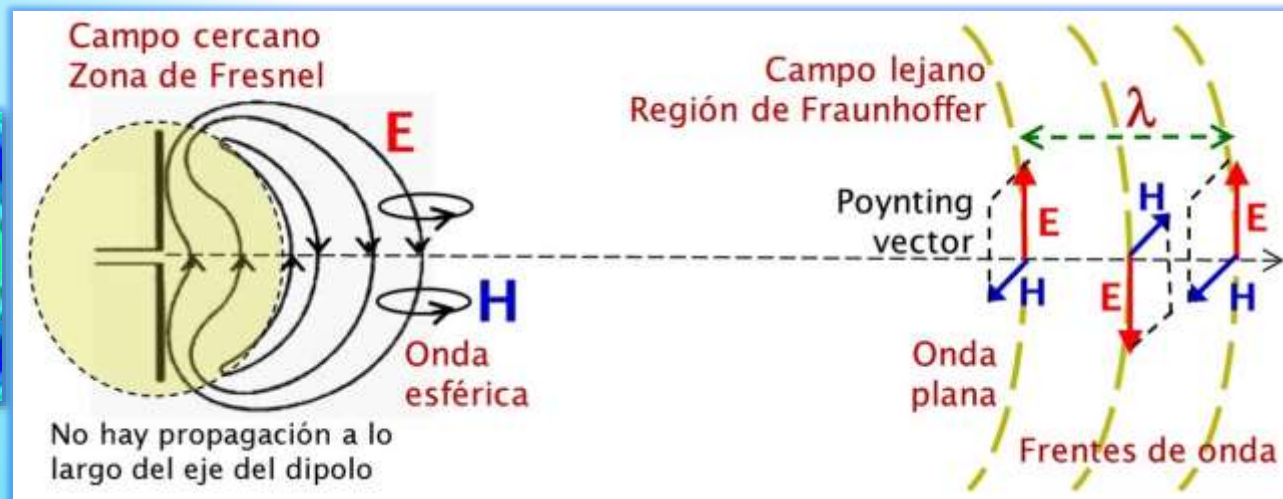
1.- PROPIEDADES DE LA ONDA DE RADIO

PROPIEDADES DE LA ONDA ELECTROMAGNÉTICA

Campo de radiación lejano

(Kraus, 2000)

- **El análisis de radiación** de una antena se efectúa en la región de **campo lejano** (a varias longitudes de onda de distancia). En general, un receptor está a mayor distancia.
- **La onda radiada** se expande en forma de **onda esférica**. Los **frentes de onda** son esferas centradas en el centro de la antena y la amplitud y fase dependen de la distancia a la antena, que es el radio de la esfera.
- **Para un observador** en campo lejano, el frente de onda de la onda esférica parece ser casi plana, como si fuese una **onda plana** uniforme.
- **Una de las propiedades** que caracteriza a la onda plana es que los campos son **modo TEM**, es decir que el **campo E**, el **H** y la **dirección** de propagación, son perpendiculares entre sí.



Propiedades de la onda de radio

PROPIEDADES DE LA ONDA ELECTROMAGNÉTICA

Impedancia característica del espacio libre

(Blake, 2004)

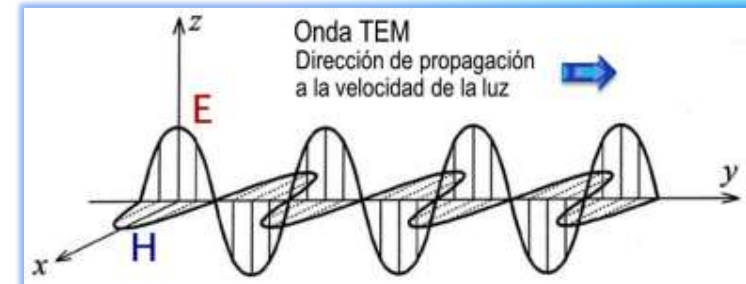
- **Ley de Ohm para circuitos.** Es la relación entre el voltaje y la corriente en circuitos que usan constantes concentradas (**Ley de Ohm** para circuitos).
- **Ley de Ohm para ondas.** Se expresa como la relación entre las intensidades de los **campos E** y **H** de la onda electromagnética que se propaga por el espacio libre.
- **Las unidades** de los campos se expresa en V/m y A/m respectivamente, por lo que esta relación recibe el nombre de **impedancia característica del espacio libre** y se expresa en Ω .
- **Es una relación constante** en cualquier tiempo y espacio. Su valor (377Ω), se obtiene de una combinación de valores de cantidades de origen eléctrico y magnético.
- **Ejemplo 1. Intensidad de campo.** Una onda tiene una intensidad de campo eléctrico de 100 V/m en el aire. Calcule la intensidad de campo magnético.

$$R = \frac{V}{I}$$

R = resistencia, en Ω .
 V = voltaje, en V .
 I = corriente, en A .

$$Z_0 = \frac{E}{H}$$

Z_0 = impedancia característica, en Ω .
 E = campo eléctrico, en V/m .
 H = campo magnético, en A/m .



$$Z_0 = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377 \Omega$$

Z_0 = impedancia característica, en Ω .
 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$. Permeabilidad magnética.
 $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$. Permitividad dieléctrica.

$$H = 265 \text{ mA/m}$$

Propiedades de la onda de radio

PROPIEDADES DE LA ONDA ELECTROMAGNÉTICA

Densidad de potencia de la onda (Blake, 2004)

- **Potencia para circuitos.** Es la ecuación de la potencia en circuitos que usan constantes concentradas.
- **Para ondas** se define la **densidad de potencia** (S), que se expresa como el producto escalar entre las intensidades de los campos E y H de la onda electromagnética que se propaga por el espacio libre.
- Las unidades** de los campos se expresa en V/m y A/m respectivamente, por lo que la densidad de potencia se expresa en W/m^2 .
- En términos físicos**, la densidad de potencia en el espacio es la cantidad de potencia que fluye por cada m^2 de una superficie perpendicular a la dirección de propagación.
- El producto vectorial** de los campo E y H corresponde al módulo del **Vector de Poynting**, que en condiciones de campo lejano apunta siempre en la dirección de propagación. **E y H son ortogonales**, por tanto, el producto vectorial es igual que el escalar.
- Ejemplo 2. Intensidad de campo.** Una onda tiene una densidad de potencia de $50 \text{ mW}/m^2$ en el espacio libre. Calcule sus intensidades de campo E y H .
- Ejemplo 3. Intensidad de campo.** Calcule la densidad de potencia que se requiere para producir una intensidad de campo E de $100 \text{ V}/m$ en el aire.

$$P = VI = I^2R = \frac{V^2}{R}$$

P = potencia, en W .
 V = voltaje, en V .
 I = corriente, en A .
 R = resistencia, en Ω .

$$S = EH = H^2Z_0 = \frac{E^2}{Z_0}$$

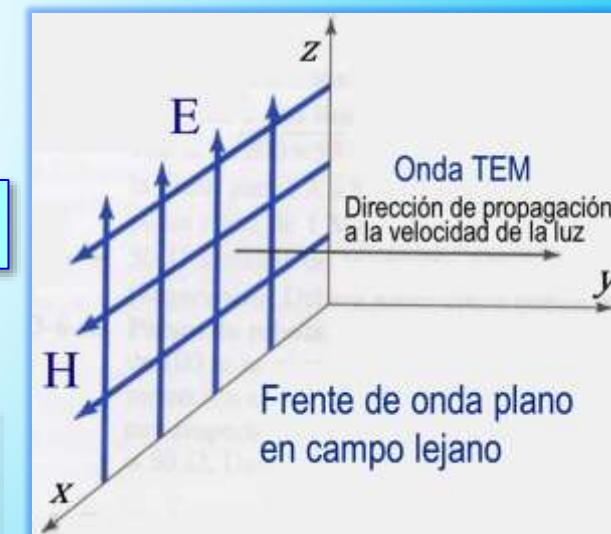
S = densidad de potencia, en W/m^2 .
 E = campo eléctrico, en V/m .
 H = campo magnético, en A/m .
 Z_0 = impedancia característica, en Ω

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$$

$$E = 4,34 \text{ V}/m$$

$$H = 11,52 \text{ mA}/m$$

$$S = 26,5 \text{ W}/m^2.$$



Propiedades de la onda de radio

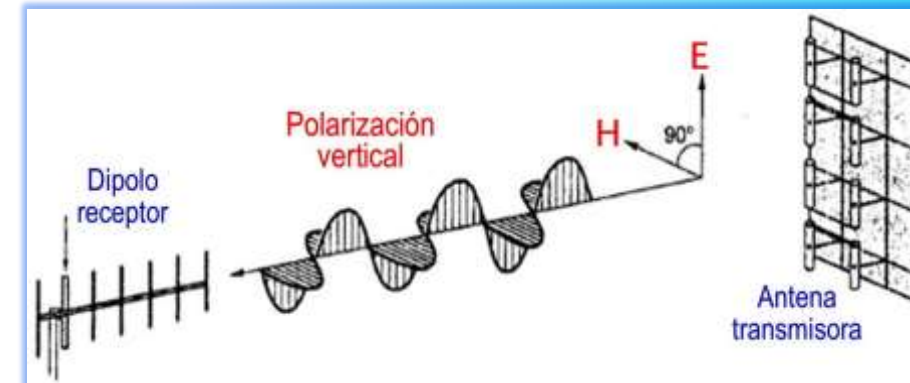
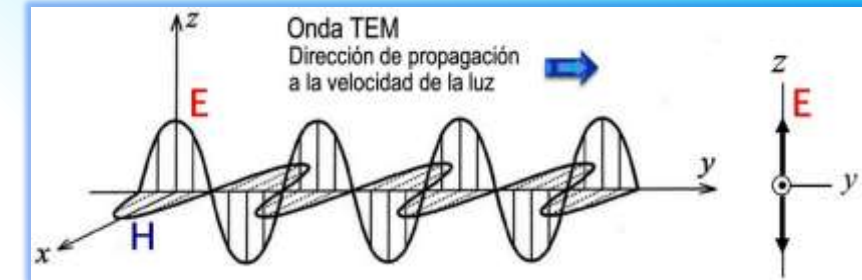
PROPIEDADES DE LA ONDA ELECTROMAGNÉTICA

Polarización lineal de la onda (Blake, 2004)

- **En la tecnología inalámbrica**, polarización se refiere a la orientación de los campos E y H con respecto a la Tierra. Si la dirección del campo E no varía, la polarización es lineal; y puede ser vertical u horizontal.
- **► Vertical.** Si E es perpendicular a la Tierra, la onda está polarizada de modo vertical. Una antena vertical produce **polarización vertical**.
- **► Horizontal.** Si E es paralelo a la Tierra, la onda está polarizada de modo horizontal. Una antena horizontal produce **polarización horizontal**.
- **Ejemplo 4. Polarización lineal.** Una onda de radio se propaga de tal manera que su campo magnético es paralelo con el horizonte. ¿Cuál es su polarización?
- **Ejemplo 5. Polarización lineal.** Si se utilizan antenas transmisoras que radian ondas con polarización vertical u horizontal, entonces, para una óptima recepción, las antenas receptoras debe tener la misma polarización que la onda. ¿Qué solución se adopta para la recepción de señales de TV?

Vertical

Las estaciones de TV radian ondas con polarización vertical y horizontal.



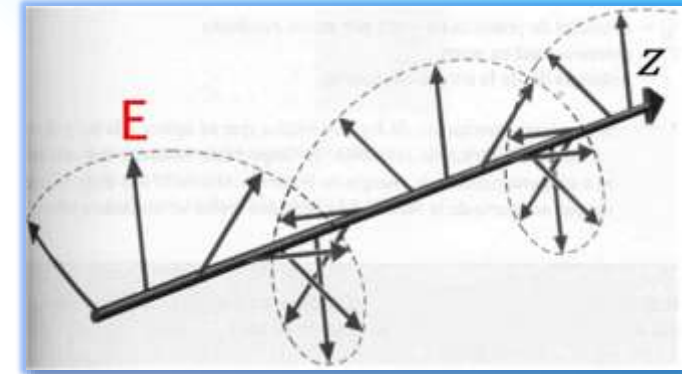
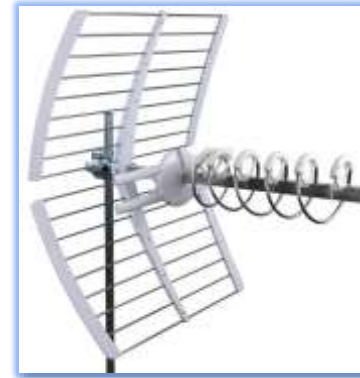
Propiedades de la onda de radio

PROPIEDADES DE LA ONDA ELECTROMAGNÉTICA

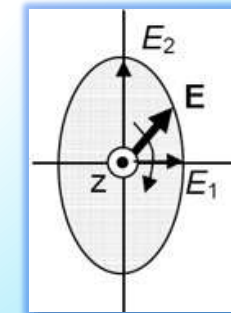
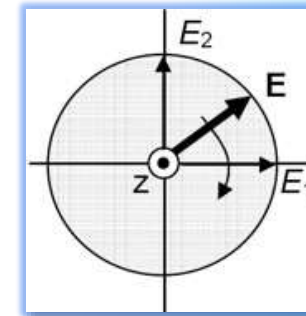
Polarización circular y elíptica

(Blake, 2004)

- **A veces el eje** de polarización gira a medida que la onda se mueve por el espacio. Gira 360° por cada λ de recorrido. Esta polarización puede ser circular o elíptica y se puede conseguir, por ejemplo, con una antena helicoidal.



- **►Circular.** Es circular si la intensidad del campo E es igual en todos los ángulos. La polarización puede ser de mano derecha (**RHCP**) o izquierda (**LHCP**).
 - **Las ondas** con polarización circular se reciben bien con antenas con polarización vertical, horizontal o circular. La radiodifusión comercial FM utiliza polarización circular.
- **►Elíptica.** Es **elíptica** si la intensidad del **campo E** varía conforme cambia la polarización. Es una variante de la polarización circular.



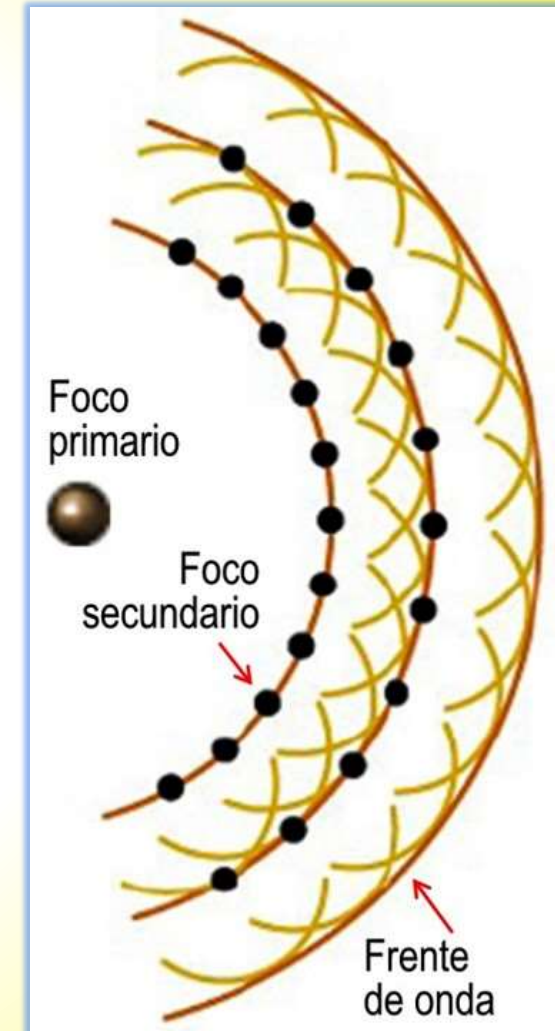
2. PROPIEDADES ÓPTICAS DE LA ONDA DE RADIO

PROPIEDADES DE LA ONDA ELECTROMAGNÉTICA

Mecanismo de propagación de la onda

(APC, 2007)

- **1. El Principio de Huygens** es un principio importante para entender el mecanismo de propagación de la onda de radio esférica que es radiada al espacio libre por un radiador o antena al que se denomina **Foco primario**.
- **2. Cuando la onda** se propaga, aparecen unos puntos que toman parte en el movimiento. La superficie que los contiene es un **frente de onda**.
- **3. El Principio de Huygens** establece que todo punto de un **frente de onda** actúa como **foco secundario** de ondas esféricas.
- **4. La superposición** de las ondas esféricas producidas por los **focos secundarios** conforman un nuevo **frente de onda**.
- **5. El nuevo frente de onda** es la superficie que contiene a los nuevos **focos secundarios**, y así sucesivamente.
- **6. Un frente de onda** no perturbado viaja como una sola pieza.



Propiedades ópticas de la onda de radio

PROPIEDADES DE LA ONDA ELECTROMAGNÉTICA

¿Qué sucede con la onda cuando viaja?

(Blake, 2004)

- **La onda de radio** es idéntica a la de luz, excepto por la frecuencia, y se comporta de forma similar en cuanto a sus propiedades. Su menor frecuencia (longitud de onda más larga) repercute en situaciones prácticas.
 - ▶ **1. Absorción.** Transfiere energía al medio cuando viaja.
 - ▶ **2. Reflexión.** Se refleja en metales, superficie del agua y desde el suelo; con el mismo ángulo con el que impacta la superficie.
 - ▶ **3. Refracción.** Se desvía de su trayectoria cuando pasa de un medio a otro de diferente densidad; cambiando de velocidad.
 - ▶ **4. Difracción.** Se esparce en todas direcciones cuando encuentra un obstáculo en su trayectoria, rellenando la zona de sombra o penetrando por un agujero.
 - ▶ **5. Interferencia.** Si se interfiere con otra onda de la misma frecuencia, se amplifica o se anula, dependiendo de la relación de fase o posición relativa entre ellas.

Propiedades ópticas de la onda de radio

PROPIEDADES DE LA ONDA ELECTROMAGNÉTICA

Absorción

(APC, 2007)

- **La onda transfiere energía** al medio cuando viaja, lo que se traduce en una atenuación de su energía. Para las microondas, el **metal** y el **agua** son absorbentes perfectos; son a las microondas lo que una pared de ladrillo es a la luz.
 - ► **En el metal**, los electrones se mueven libremente y absorben la energía de la onda que lo atraviesa.
 - ► **En el agua**, las microondas provocan que las moléculas de agua se agiten y **absorban** energía. La lluvia y la niebla causan, además, que la onda se disperse lo que resulta en más atenuación. Un cambio en el clima afecta a una comunicación por radio.
 - ► **En rocas, ladrillos, concreto, árboles y madera**, el nivel de absorción depende de cuánta agua contienen. La madera seca es transparente. Los árboles causan de **10 a 20 dB** de pérdida por cada uno que esté en el camino directo de la onda; las paredes causan de **10 a 15 dB**.
 - ► **Los plásticos** no absorben energía de radio, aunque depende de la constitución del plástico.
 - ► **El cuerpo humano** y el de los animales es un absorbente prominente porque está compuesto mayormente de agua.

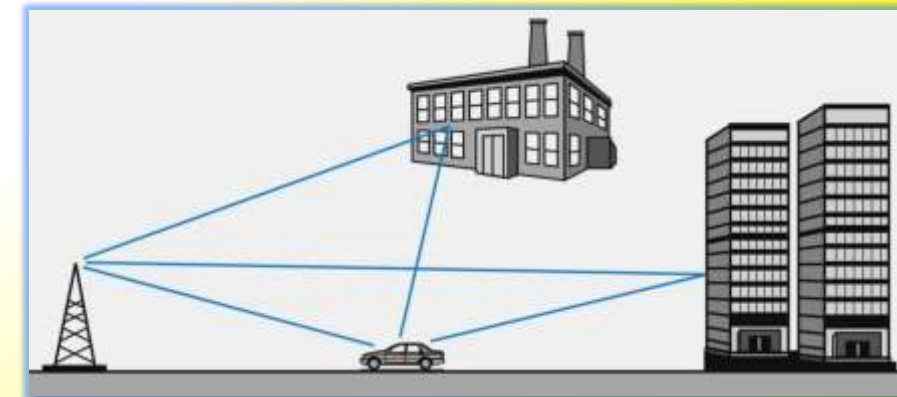
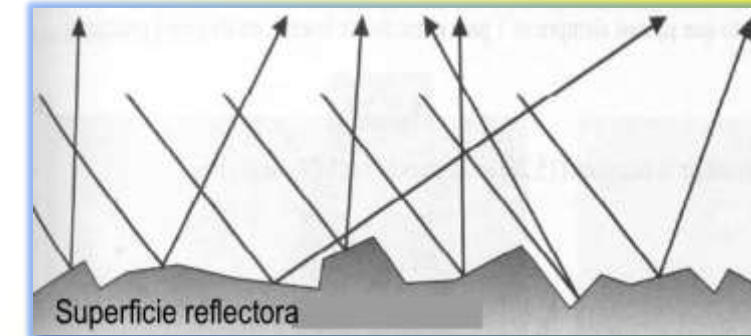
Propiedades ópticas de la onda de radio

PROPIEDADES DE LA ONDA ELECTROMAGNÉTICA

Reflexión

(Frenzel, 2003)

- **La onda se refleja** en metales, superficie del agua y desde el suelo; con el mismo ángulo con el que impacta la superficie. Para la onda de radio, una rejilla metálica con separaciones menores que la longitud de onda, actúa como una placa de metal.
- **La reflexión invierte** la polaridad, lo cual equivale a un desfase de **180°** o al cambio de dirección del **campo E** del frente de onda. Es como un salto de la onda.
- **Las superficies reflectoras** no siempre son uniformes. Las ondas, a menudo, se reflejan desde el suelo, produciendo una **reflexión difusa**, es decir la dispersión de la onda reflejada.
- **En ambientes** internos o en exteriores, abundan objetos de metal de formas variadas y complicadas que producen el **efecto multitrayectoria**: la onda llega al receptor por diferentes caminos y, por consiguiente, en tiempos diferentes causando el **desvanecimiento** parcial de la onda recibida.
- **La reflexión** se utiliza en las antenas parabólicas.



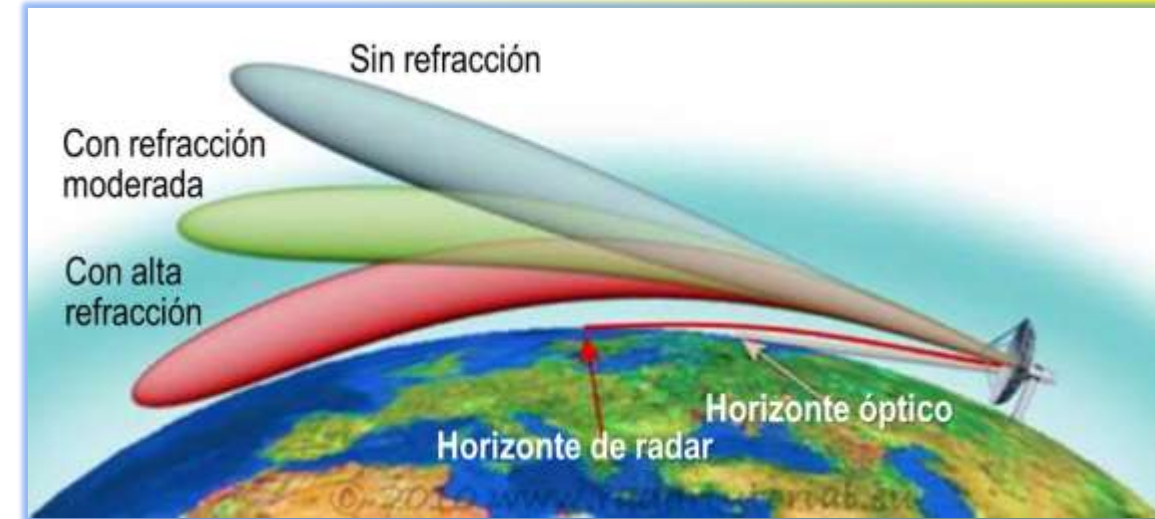
Propiedades ópticas de la onda de radio

PROPIEDADES DE LA ONDA ELECTROMAGNÉTICA

Refracción

(Blake, 2004)

- La **onda se desvía** de su trayectoria cuando pasa de un medio a otro de diferente densidad porque cambia su velocidad.
- La **densidad** del aire disminuye con la altura, debido a que disminuye la presión, la temperatura y la humedad. Esto produce que las capas de la atmosfera tengan diferentes densidades, ocasionando que la onda **aumente su velocidad** con la altura y se **refracte**, se “doble” hacia la Tierra.
- **Los cambios** en las condiciones atmosféricas también producen cambios en la velocidad de la onda.
- **En noches despejadas** se presenta el fenómeno de la **inversión térmica**: el suelo se enfría por radiación y enfría al aire en contacto con él, que se vuelve más frío y pesado que el que está en capas superiores. El resultado es que la energía transmitida, por ejemplo por un radar, se extiende a una **distancia mayor** que su rango normal.



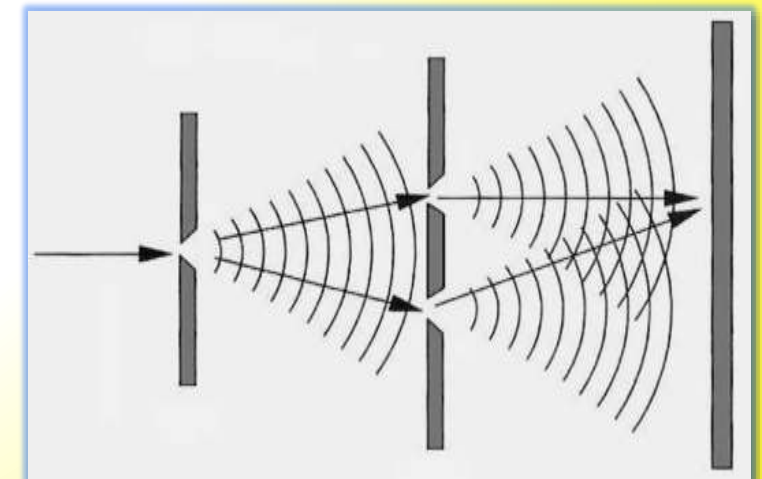
Propiedades ópticas de la onda de radio

PROPIEDADES DE LA ONDA ELECTROMAGNÉTICA

Difracción

(Blake, 2004)

- **La onda se esparce** en todas direcciones cuando encuentra un obstáculo en su trayectoria, rellenando la zona de sombra o penetrando por un agujero. El efecto se describe suponiendo que cada punto en un frente de onda actúa como un foco secundario de ondas esféricas.
- **Se aprovecha** el efecto de la difracción para rodear obstáculos. Esto implica que la onda puede “dar la vuelta” en una esquina.
- **La difracción** es mayor cuando el obstáculo tiene un borde afilado, es decir sus dimensiones son pequeñas comparadas con la longitud de onda, o cuando el tamaño del agujero es parecido a la longitud de onda. Por esta razón una estación AM que opera a 1000 kHz ($\lambda = 300$ m) se oye fácilmente aún cuando hayan considerables obstáculos en su trayecto.
- **La potencia** de la onda difractada es significativamente menor que la del frente onda que la produce.



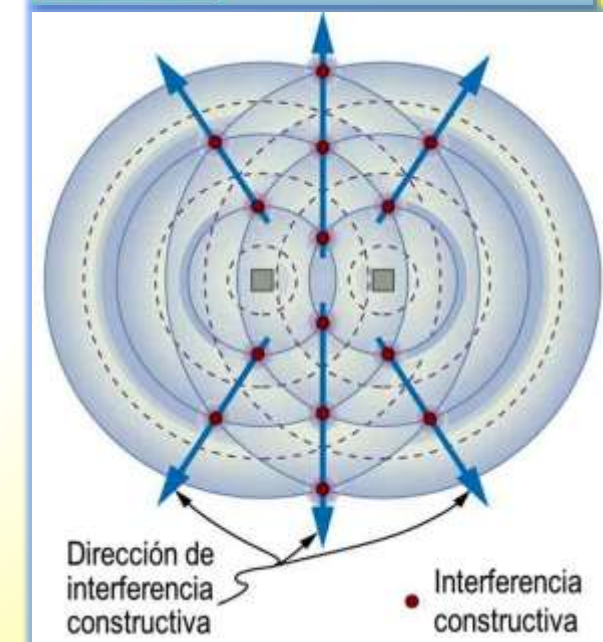
Propiedades ópticas de la onda de radio

PROPIEDADES DE LA ONDA ELECTROMAGNÉTICA

Interferencia

(APC, 2007)

- **La onda Si se interfiere** con otra onda de la misma frecuencia, se amplifica o se anula, dependiendo de la relación de **fase** o posición relativa entre ellas.
- **Para que ocurra** la máxima amplificación o completa anulación, las ondas deben tener la misma longitud de onda y energía y una relación de fase específica y constante.
- **En tecnología inalámbrica**, la interferencia tiene un significado más amplio, como la perturbación debido a otras emisiones de radio frecuencia, por ejemplo canales adyacentes. El caso más común es que las ondas se combinen y generen una nueva onda que no pueda ser utilizada en la comunicación.
- **Las técnicas de modulación** ayudan a manejar la interferencia.



Referencias bibliográficas

PROPIEDADES DE LA ONDA ELECTROMAGNÉTICA

Referencias bibliográficas

- 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.

FIN

Tema 2 de:
COMUNICACIÓN POR RADIO
Edison Coimbra G.