



Unidad 03: Introducción a la Física de la Radio

Desarrollado por: Sebastian Buettrich, wire.less.dk

Editado por: Alberto Escudero Pascual, IT +46

Traducción de LaNeta

Tabla de contenido

1.1 Información sobre propiedad intelectual.....	2
1.2 Grado de dificultad.....	2
1.3 Información sobre los iconos.....	2
2. Introducción.....	2
3. Campos y ondas electromagnéticas.....	3
3.1 Características de las ondas electromagnéticas.....	3
3.1.1 Los campos eléctrico y magnético.....	3
3.1.2 Medio de transporte.....	4
3.1.3 Longitud de onda y frecuencia.....	4
4. Polarización.....	5
5. Radiación de un dipolo.....	6
6. El espectro electromagnético.....	7
6.1 Las frecuencias de las redes inalámbricas.....	7
7. Propagación de ondas electromagnéticas.....	8
7.1 Absorción.....	9
7.2 Reflexión.....	9
7.3 Difracción.....	11
7.4 Refracción.....	12
7.5 Interferencia.....	12
8. Efectos dependientes de la frecuencia.....	13
9. Propagación radial en espacio libre.....	13
9.1 Pérdida de espacio libre (FSL).....	14
9.2 Zonas de Fresnel.....	15
9.3 Línea de vista.....	16
9.4 Multitrayectoria.....	16
10. Cuando la física hace una diferencia.....	17
11. Conclusiones.....	18
11.1 Recursos adicionales.....	19
12. Declaración de Derechos de Propiedad Intelectual.....	20

Sobre este documento

Este material es parte del paquete de materiales del proyecto TRICALCAR. Para información sobre TRICALCAR consulte el módulo de introducción de estos materiales, o www.wilac.net/tricalcar/. Este material fue traducido del inglés de los materiales desarrollados para el proyecto "Capacity Building for Community Wireless Connectivity in Africa" de APC <<http://www.apc.org/wireless/>>. El material fue actualizado y adaptado para el contexto de América Latina.

1.1 Información sobre propiedad intelectual

Esta unidad temática se ha hecho disponible bajo los términos de la licencia **Atribución-No Comercial-Licenciamiento Recíproco 3.0 Genérica**. Para ver los términos completos de esta licencia: http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/deed.es_MX

1.2 Grado de dificultad

El grado de dificultad de esta unidad es "básico" con algunas secciones "avanzadas" adicionales. Todas las secciones "avanzadas" están dentro de un recuadro de fondo gris, para que el lector tenga conciencia del mayor grado de dificultad.

1.3 Información sobre los iconos

En los contenidos encontraremos 5 tipos de iconos, cuyo significado se describe a continuación:

Concepto teórico clave	Recomendación práctica importante	Ejercicio	Propiedad intelectual	Propiedad intelectual
				

2. Introducción

Esta unidad busca dar al lector un panorama sobre física de las ondas de radio, como un conocimiento básico necesario para avanzar en el estudio del tema de las comunicaciones inalámbricas.

Específicamente, aborda los principios básicos de las ondas en las comunicaciones de datos inalámbricas.

La unidad nos introduce a la esencia de los campos electromagnéticos y sus características. Se presentan brevemente los conceptos de electromagnetismo, absorción, reflexión, difracción, refracción e interferencia. Se discute el tema de la propagación en espacio libre junto con los conceptos de pérdida en el espacio libre, zonas de Fresnel, línea de vista y trayectoria múltiple. Finalmente, se presenta un conjunto de ejemplos y buenos consejos para superar algunos problemas que puedan surgir.

3. Campos y ondas electromagnéticas

La radiación electromagnética, conocida también como onda electromagnética, es una onda que se propaga en el espacio con componentes eléctricos y magnéticos. Los componentes eléctricos y magnéticos oscilan perpendiculares uno respecto al otro y en dirección a la línea de propagación. Ver figura 1.

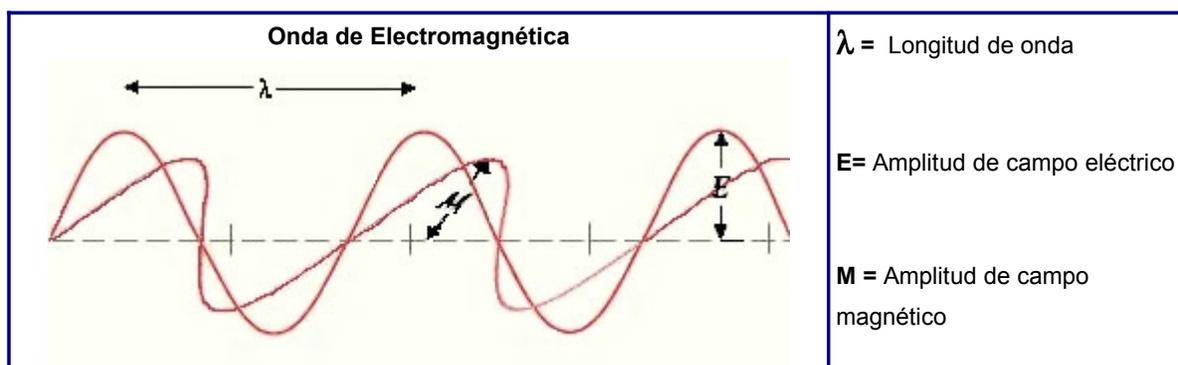


Figura 1: Ilustración de los campos eléctrico y magnético oscilando alrededor de su eje, perpendiculares entre sí y en dirección a la línea de propagación. Fuente:Wikipedia.org

3.1 Características de las ondas electromagnéticas

Se describen a continuación algunas de las características de las ondas electromagnéticas.

3.1.1 Los campos eléctrico y magnético

Las fuerzas electromagnéticas actúan entre cargas y corrientes eléctricas. Para cada punto en el espacio, un campo electromagnético (la fuerza experimentada por una carga o corriente en cualquier

punto) puede ser definido y medido. El campo eléctrico **E** describe la fuerza entre cargas y el campo magnético **H** describe las fuerzas entre corrientes.

3.1.2 Medio de transporte

Una cualidad de las ondas electromagnéticas es que no necesitan un medio de transporte. No hace falta aire u otra cosa para que se propaguen, a diferencia del sonido, que es propagado mediante la presión del aire, y por ende necesita aire como medio de transporte.

La luz, los rayos x, las microondas y otras ondas de radio constituyen ejemplos de ondas electromagnéticas.

3.1.3 Longitud de onda y frecuencia

Una onda electromagnética, como cualquier onda, tiene como forma básica una senoide, con valles y crestas. La longitud de onda es la distancia entre dos crestas (o valles) consecutivos y se mide en metros.

La longitud de onda se representa con la letra griega λ (lambda).

La frecuencia de una onda es el ritmo de oscilación y se mide en hertz. (Hz). La unidad de frecuencia corresponde a una oscilación por segundo (1/s).

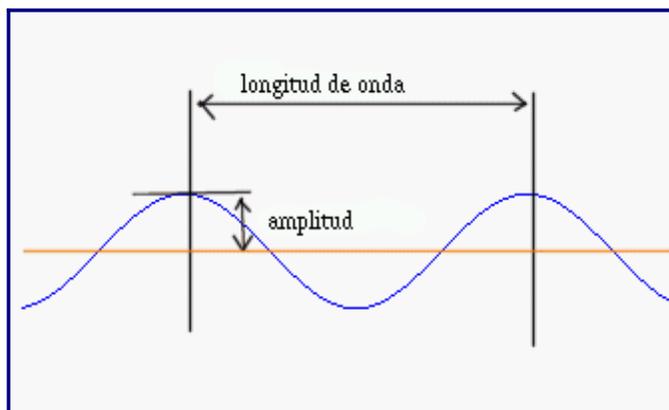


Figura 2: Características de las ondas electromagnéticas

La frecuencia y la longitud de onda tienen la siguiente relación:

$$c = \lambda * f$$

donde:

c = la velocidad de la luz [m/s] (3×10^8 m/s = 300.000 km/s en el vacío)

λ = longitud de onda [m]

f = frecuencia* [1/s] (Hz)

(*) a la frecuencia también se la denomina con la letra griega ν (Nu)

De esta manera, una onda electromagnética con una frecuencia de 2,4 GHz tiene una longitud de onda de 12,5 cm.

Toda onda electromagnética (incluyendo la luz o una señal de radio) viaja a la velocidad de la luz, por lo que necesita 1.3 segundos para recorrer la distancia entre la luna y la tierra, 8 minutos desde el sol y 300 micro segundos para recorrer 100 km.

A continuación se ve un repaso de las notaciones de “potencias de 10”, las cuales son usadas en todo tipo de unidades, ej. micrómetro, kilohertz y megabytes.

Prefijo	Cantidad		Símbolo
Nano	10^{-9}	1/ 1,000,000,000	n
Micro	10^{-6}	1/1,000,000	μ
Mili	10^{-3}	1/1,000	m
Centi	10^{-2}	1/100	c
Kilo	10^3	1,000	k
Mega	10^6	1,000,000	M
Giga	10^9	1,000,000,000	G

Tabla 1: Prefijos y símbolos de “potencias de diez”

4. Polarización

La polarización es la dirección el campo eléctrico en una onda que se propaga. La polarización puede ser Lineal, Elíptica y Circular.

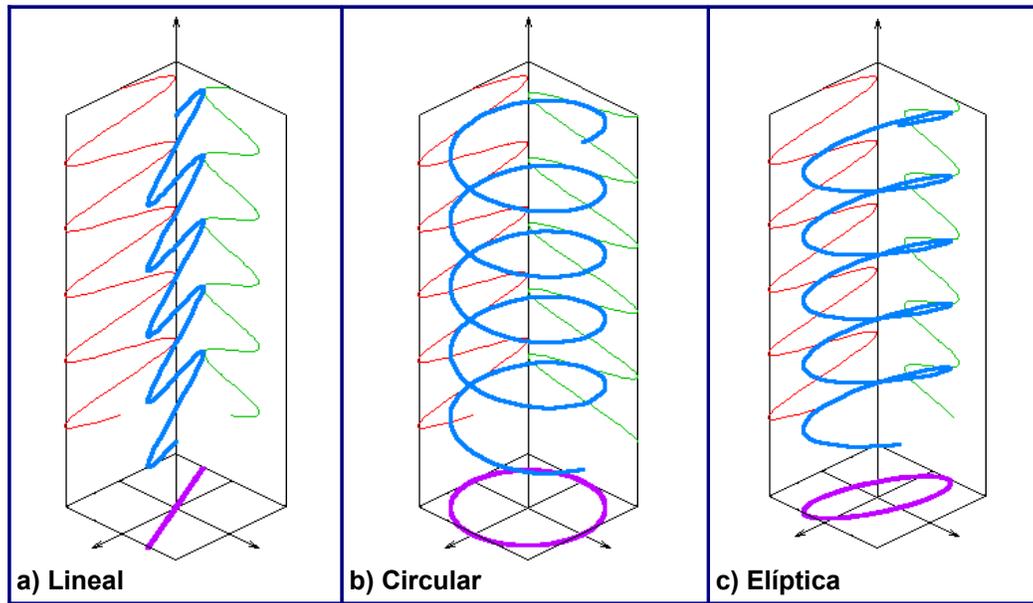


Figura 3: Polarización de la onda

5. Radiación de un dipolo

La radiación de un dipolo es el campo electromagnético producto del sistema de electrones en movimiento oscilatorio en un conductor lineal, o sea un alambre recto. Es una de las formas más simples de una antena; la antena de dipolo.

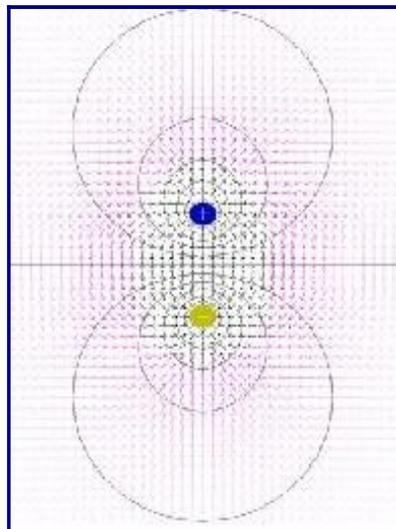


Figura 4: Radiación de dipolo

6. El espectro electromagnético

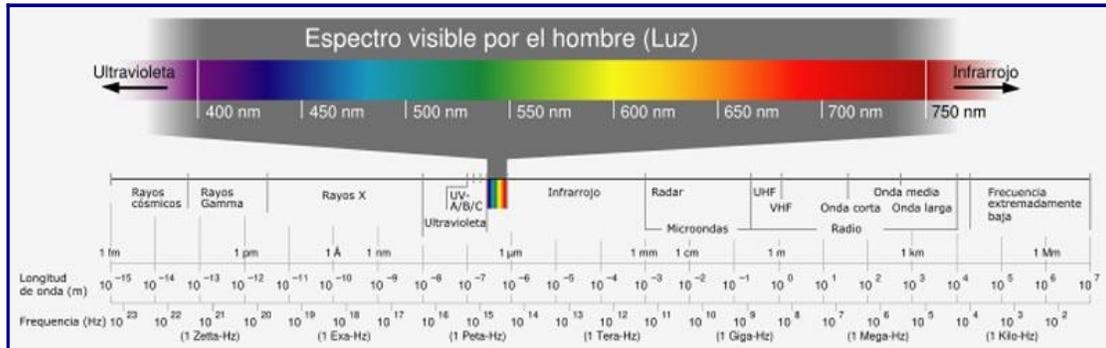


Figura 5: El espectro electromagnético. Fuente: Wikipedia.org

6.1 Las frecuencias de las redes inalámbricas

En el contexto de las redes inalámbricas, nos enfocamos en las bandas industriales, científicas y médicas, libre de licencias (ISM, por su versión en inglés), en:

Frecuencia	Estándar	Longitud de Onda
2,4 GHz	802.11 b/g	12,5 cm
5, x GHz	802.11a	5-6 cm

Tabla 2: Frecuencias y longitud de onda en las redes inalámbricas

Las dos figuras siguientes (6 y 7) dan una idea del espectro electromagnético y su uso en diferentes valores de longitud de onda.

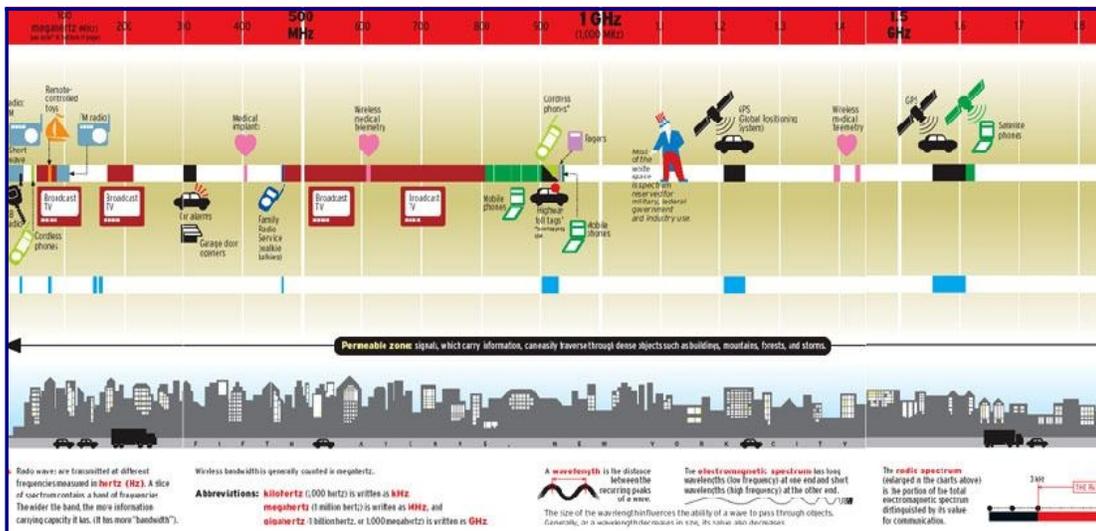


Figura 6: El uso del campo electromagnético entre 500 MHz to 1.5 GHz.

Fuente: The Citizens Guide to the Airwaves, New America Foundation. <http://newamerica.net>

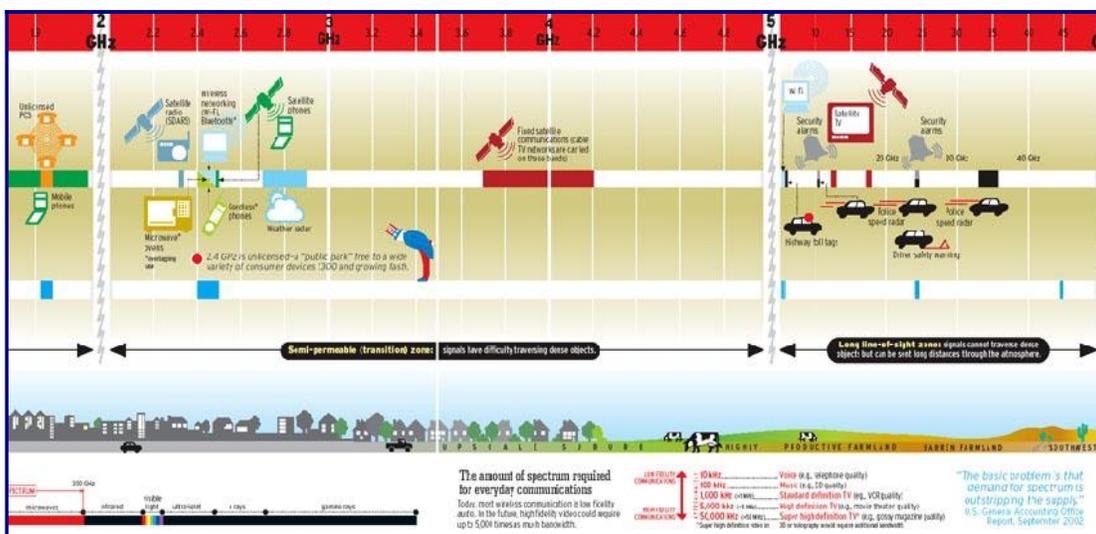


Figura 7: El uso del campo electromagnético entre 2 GHz y 5 GHz.

Fuente: The Citizens Guide to the Airwaves, New America Foundation. <http://newamerica.net>

7. Propagación de ondas electromagnéticas

Un principio importante cuando se trata de entender la propagación de ondas electromagnéticas, y por ende de ondas de radio, es el **principio de Huygens**, el cual en su forma simplificada puede ser formulado como:



“En cualquier punto de un frente de onda, se puede considerar que se origina un nuevo frente de onda esférico”.

Si sumamos las ondas esféricas de un frente de onda, entendemos por qué un frente de onda no perturbado viaja como una sola pieza. El principio de Huygens también explica por qué la luz (ondas de radio, o cualquier onda electromagnética) no siempre viaja en línea recta.

Las ondas electromagnéticas están sometidas a una serie de efectos: **Absorción, Reflexión, Difracción, Refracción e Interferencia.**

7.1 Absorción

Las ondas de radio, de cualquier clase, son atenuadas o debilitadas mediante la transferencia de energía al medio en el cual viajan cuando éste no es el vacío.

La potencia de la onda decrece exponencialmente en el medio, correspondiendo a un decrecimiento lineal en dB (ver cálculo del presupuesto de enlaces con dB).

Normalmente, un coeficiente de absorción (en dB/m) se usa para describir el impacto del medio en la radiación, de manera cuantitativa.

En general, encontramos una fuerte absorción en los materiales conductores, sobre todo en metales. El otro material absorbente para las ondas, en las frecuencias relevantes a las redes inalámbricas, (rango de microondas) es el agua en todas sus formas (lluvia, neblina, y la contenida en el cuerpo humano).

Encontramos absorción intermedia en rocas, ladrillos y concreto, dependiendo de la composición de los materiales. Lo mismo funciona para la madera, árboles y otros materiales; su comportamiento es fundamentalmente determinado por su concentración de agua.

En el contexto de la absorción de las ondas de radio, los seres humanos y muchos animales pueden ser vistos como recipientes de agua, en consecuencia como materiales absorbentes prominentes.

7.2 Reflexión

Todos conocemos la reflexión de las ondas visibles en espejos o superficies de agua. Para la radio frecuencia, la reflexión ocurre principalmente en el metal, pero también en superficies de agua y otros

materiales con propiedades similares. El principio básico de la reflexión es que una onda se refleja con el mismo ángulo con el que impacta una superficie.

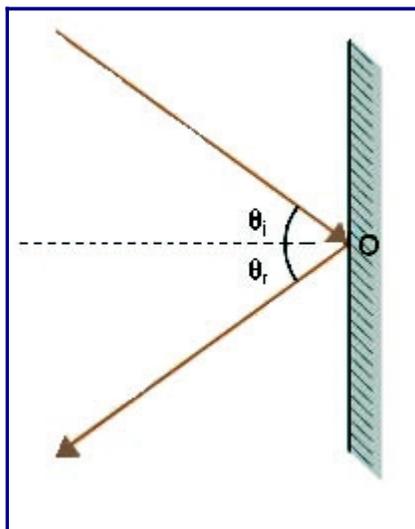


Figura 8: Reflexión de una onda, con el mismo ángulo de incidencia.

Dos casos importantes de reflexión: en una superficie plana (figura 9) y en una superficie parabólica (figura 10).

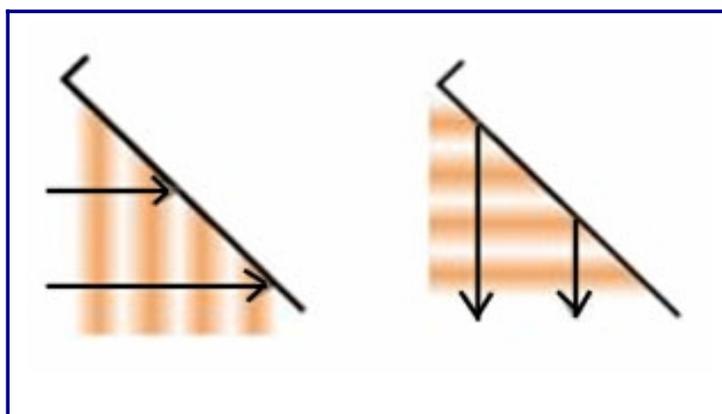


Figura 9: Reflexión en un plano

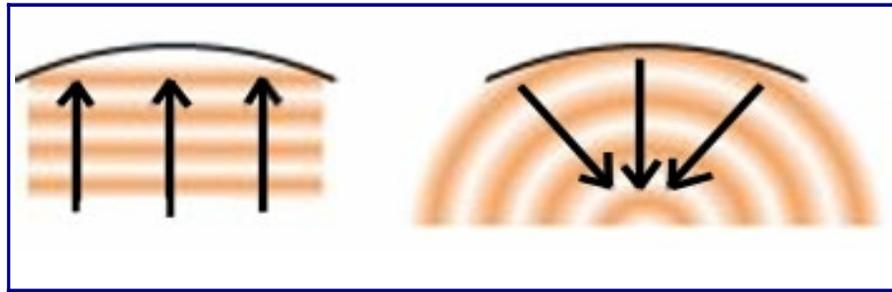


Figura 10: Reflexión en una parábola

7.3 Difracción

La difracción es un fenómeno basado en el hecho de que las ondas no se propagan en una sola dirección. Ocurre cuando las ondas encuentran un obstáculo en su trayectoria y divergen en muchas haces. La difracción implica que las ondas pueden “dar la vuelta” en una esquina, como se ilustra en la figura 11.

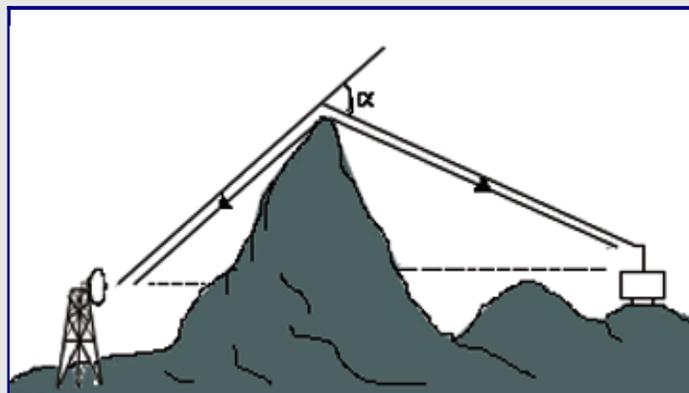


Figura 11: Difracción de una onda electromagnética

La difracción es una consecuencia directa del principio de Huygens, y se incrementa en función de la longitud de onda. Esto significa que puede esperarse que las trayectorias de las ondas se aparten de la rectilínea más fácilmente a medida que se incrementa la longitud de onda.

Esa es la razón por la cual una estación de radio AM que opera a 1000 kHz (con una longitud de onda de 300 m) se oye fácilmente aún cuando haya considerables obstáculos en su trayecto, mientras que con redes inalámbricas (con una longitud de onda de 12 cm) se requiere una línea de vista entre transmisor y receptor.

7.4 Refracción

La refracción es la desviación aparente de las ondas cuando encuentran un medio con composición diferente. Cuando un frente de onda pasa de un medio a otro diferente, cambia de velocidad y en consecuencia, de dirección (figura 12)

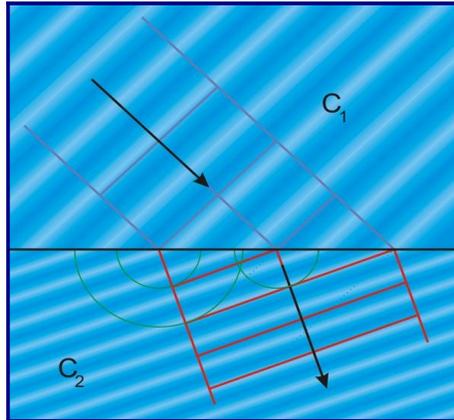


Figura 12: Refracción de ondas

Las líneas azules representan el frente de onda entrante mientras que las rojas representan el frente de ondas desviadas por la refracción. C_1 es un medio con una velocidad de propagación mayor a C_2 . El ángulo que forman ambos frentes de onda depende de la composición del material del obstáculo (C_2).

7.5 Interferencia

Las ondas con una misma frecuencia y una relación de fase (posición relativa de las ondas) constante pueden anularse entre sí, de manera de la suma de una onda con otra puede resultar en cero.

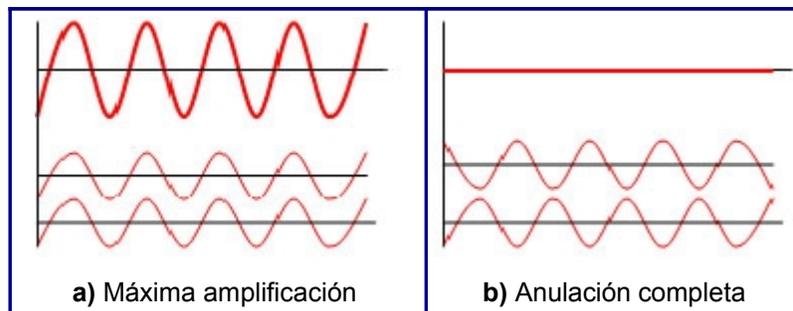


Figura 13: Interferencia

Para que esto ocurra en su forma más pura (anulación máxima o amplificación completa), las ondas deben tener exactamente la misma longitud de onda y energía, y una relación de fase específica y constante.

En tecnología inalámbrica, la palabra interferencia se usa típicamente en un sentido más amplio, como perturbación debido a otras emisiones de radio frecuencia.

8. Efectos dependientes de la frecuencia

Estos efectos están presentes en mayor o menor grado dependiendo de la frecuencia de la onda. Las fórmulas para medir estos efectos son complejas por naturaleza (por ejemplo cuando se busca una absorción por resonancia).



Sin embargo algunas reglas básicas resultan muy útiles para entender y planear la propagación de señales de radio:

- Con frecuencias más bajas, el alcance es mejor.
- Con frecuencias más bajas, la señal es más penetrante y rodea más obstáculos.
- Con frecuencias más altas, se transmite una mayor cantidad de datos.

9. Propagación radial en espacio libre

En la sección siguiente damos una mirada más cercana a cuatro efectos y conceptos relevantes en la propagación de señales de radio:

1. Pérdida en espacio libre (FSL, por sus siglas en inglés): el hecho de que una onda de radio pierde potencia incluso en una línea recta en el vacío, simplemente porque se esparce sobre una mayor región en el espacio a medida que se aleja del transmisor.
2. Zonas de Fresnel: el hecho de que las ondas de radio viajan en una amplia zona en forma de cigarro, más que en una simple línea recta.
3. Línea de vista: como se define para ondas de radio, algo diferente que para la luz.
4. Efecto de trayectoria múltiple: el hecho de que una señal puede encontrar varias vías para llegar a un receptor.

Nótese que, en buena medida, todos estos conceptos pueden ser comprendidos aplicando el principio de Huygens.

9.1 Pérdida de espacio libre (FSL)

La potencia de una señal de radio se atenúa en el vacío o en el aire. La pérdida de espacio libre mide la dispersión de la potencia en un espacio libre sin obstáculo alguno a medida que la onda se esparce sobre una superficie mayor. La señal de radio se debilita mientras se expande en una superficie esférica.

La pérdida de potencia de las ondas electromagnéticas en el espacio libre es proporcional al cuadrado de la distancia y también proporcional al cuadrado de la frecuencia.

La atenuación en el espacio libre medida decibeles (dB), viene dada por:

$$\text{FSL(dB)} = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) + K$$

d = distancia

f = frecuencia

K = constante que depende de las unidades usadas para d y f

Si **d** se mide en metros, **f** en Hz, la fórmula queda:

$$\text{FSL(dB)} = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) - 187,5$$

Como regla práctica, en una red inalámbrica de 2,4 GHz, se pierden 100 dB en el primer kilómetro y se reduce en 6 dB cada vez que se duplica esa distancia. Un enlace de 2 km tiene una pérdida de 106 dB, mientras que en 4 km es de 112 dB.

Si expresamos la distancia en kilómetros y la frecuencia en GHz la fórmula es:

$$\text{FSL(dB)} = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) + 92,4$$

9.2 Zonas de Fresnel

Recordando el principio de Huygens, es fácil ver que los puntos que no están en el eje directo entre **A** y **B** también radían alguna potencia hacia el punto **B**.

Un análisis detallado toma en cuenta la interferencia entre todas las ondas. Aunque este análisis va más allá del alcance de esta unidad, nos presenta el concepto de la primera zona de Fresnel, que debe mantenerse libre de obstáculos para poder transmitir la máxima potencia desde A a B.

Si existen obstáculos dentro de la zona de Fresnel, éstos introducirán pérdidas de obstrucción. Recuérdese que la primera zona de Fresnel es un volumen alrededor de la línea recta que une el transmisor con el receptor, por lo que hay que tener en cuenta los obstáculos por debajo pero también a los lados.

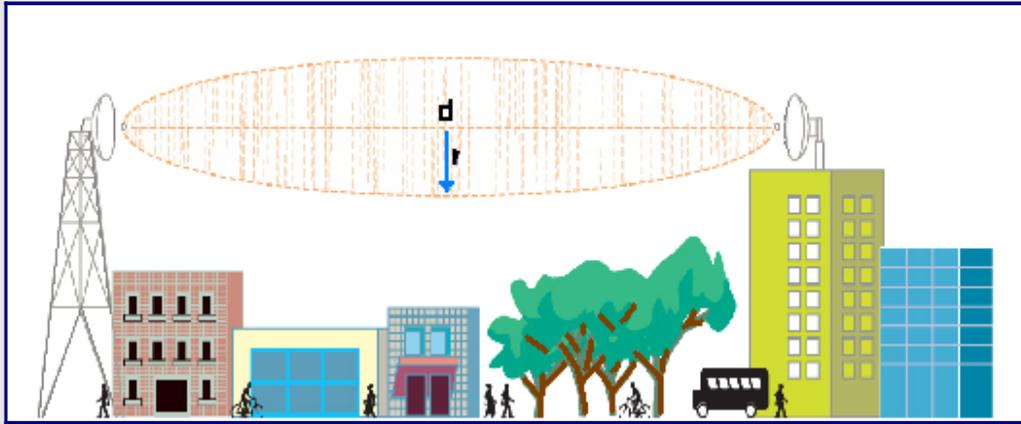


Figura 14: Zona de Fresnel

La fórmula para el radio máximo de la primera zona de Fresnel es:

$$r = 17,32 * \sqrt{(d/4f)}$$

d = distancia [km]

f = frecuencia [Ghz]

r = radio [m]

Un enlace de radio de 9.6 km requerirá una zona libre de obstáculos en un radio de **r=17,32**

metros bajo la línea de vista.

En la práctica nos conformamos con librar sólo el 60% de la primera zona de Fresnel, por lo que en el caso anterior es suficiente despejar una zona de 10,4 m en el punto medio de la trayectoria, y menos aún en los extremos. En realidad es necesario comprobar el despeje del 60% de la primera zona de Fresnel a lo largo de toda la trayectoria de propagación, pero la mejor manera de hacerlo es utilizando programas que tomen en cuenta la elevación del terreno, como el Radio Mobile, que se describe en la unidad de simulación de redes.

9.3 Línea de vista

Para la luz visible, la línea de vista es un concepto fácil de entender y comprobar. Sin embargo, las cosas son un poco más complejas para los enlaces de radio debido a que no son visibles a nuestros ojos. En general, se necesita tener una línea visual (óptica) para un radio enlace. Adicionalmente, es necesario un “poco de espacio alrededor”, definido por las Zonas de Fresnel. Ver figura 15.

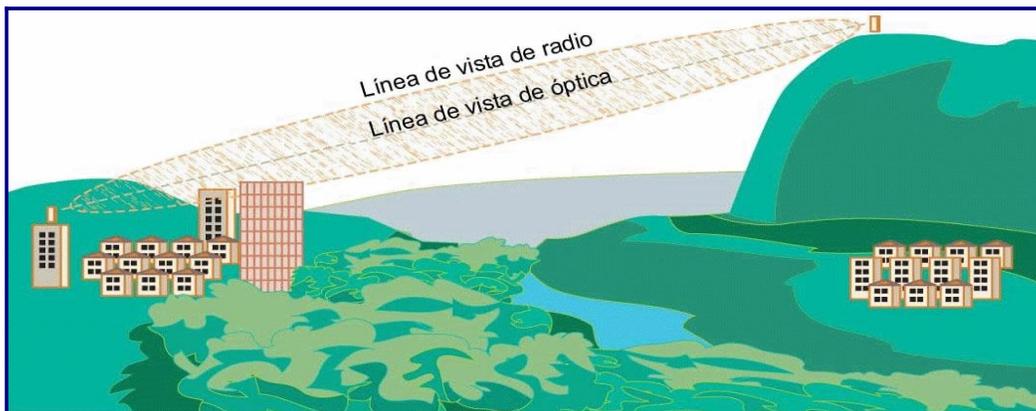


Figura 15: Línea de vista (radio) vs. línea visual (óptica)

9.4 Multitrayectoria

Una onda de radio puede llegar al receptor a través de múltiples trayectorias por reflexión. Los retrasos, la interferencia y la modificación parcial de las señales pueden causar problemas en la recepción.

Sin embargo, los efectos de trayectoria múltiple no son todos malos y a veces es posible aprovecharlos para superar los límites de la línea de vista cuando se dispone de suficiente potencia. Un enlace sin línea de vista puede ser posible con tecnologías inalámbricas suficientemente robustas frente a los efectos de trayectoria múltiple, que permitan contribuir a la transmisión de señales. (Ver Estándares Inalámbricos: MIMO IEEE 802.11n)

10. Cuando la física hace una diferencia

Concluyendo de las secciones anteriores, vamos a dar una mirada a algunos casos prácticos de redes inalámbricas donde entender física realmente importa.

Quando un punto de acceso es colocado bajo un escritorio

- Las oficinas típicamente ofrecen un ambiente de múltiples trayectoria y muchos objetos problemáticos como personas y objetos metálicos (computadoras, radiadores, escritorios).
- Entonces, la elección del lugar y la antena es esencial.

Quando el invierno deviene en primavera

- Independientemente de las zonas climáticas, los factores como la vegetación, humedad y lluvia cambian con las estaciones.
- Los árboles secos son transparentes, pero los árboles con hojas, no.

Durante las horas pico en la ciudad

- Las personas consisten en 60% de agua, la absorción es un problema.
- Las condiciones cambian con el tiempo (gente, vehículos, interferencias electromagnéticas).
- Se debe verificar el lunes lo que se midió el domingo.

Para enlaces de muy larga distancia

- Para los enlaces de larga distancia, el tiempo de recorrido de la señal puede llevar a fallas por tiempo de espera excesivo y bajo desempeño.
- Dependiendo del hardware, esto puede ser relevante en un enlace de 1-2 km.
- Con enlaces de 100 km es definitivamente un factor a considerar.

- Un indicador típico de problemas de tiempo de espera es un índice alto de pérdidas de paquetes, aunque se tenga una señal de buena potencia.

Cuando hay que diferenciar la propaganda comercial de la verdad

- Una antena o transmisor no tiene una distancia específica o radio de alcance.
- La ganancia de una antena o la potencia de transmisión de un dispositivo de radio son los datos relevantes.
- Más allá de la promesa de WiMAX de enlaces sin línea de vista, las microondas aún no atraviesan materiales absorbentes.
- Para las ondas de radio, sin embargo, nada ha cambiado. Una pared es aún una pared.
- Las técnicas de modulación logran protocolos más robustos en ambientes de trayectoria múltiple y de mucha reflexión (ej. áreas urbanas) que permiten “dar vuelta a la esquina”.

11. Conclusiones

Hemos aprendido que la familiaridad con algunos conceptos de física de la radio puede ser muy útil cuando trabajamos con redes inalámbricas. Este conocimiento no sólo nos ayuda a entender cómo trabaja el equipo de radio, sino que nos hace consciente de las implicaciones de las condiciones físicas en nuestro entorno que pueden afectar el desempeño de la red.

Los cinco temas principales a recordar en esta unidad pueden ser resumidos así:

1. El medio de transporte en las redes inalámbricas son ondas electromagnéticas en el rango de los GHz.
2. Las ondas electromagnéticas son afectadas por:
 - Atenuación
 - Absorción
 - Reflexión
 - Difracción
 - Refracción
 - Interferencia

3. Es imprescindible tomar en cuenta estos efectos para construir redes inalámbricas que funcionen.
4. La propagación de ondas de radio en espacios libres es afectada por los siguientes factores: la
 - Pérdida en espacio libre
 - Zona de Fresnel
 - Efecto de trayectoria múltiple
5. Las condiciones en el entorno cambian constantemente. Los cambios pueden ser invisibles al ojo humano, pero no a las ondas de radio.

11.1 Recursos adicionales

General

wikipedia

wikipedia.org

<http://es.wikipedia.org>

Para todos los tópicos básicos sobre física, la wikipedia es un excelente punto de partida.

Otras lecturas pueden ser:

<http://es.wikipedia.org/wiki/Electromagnetismo>

http://es.wikipedia.org/wiki/Ecuaciones_de_Maxwell

http://es.wikipedia.org/wiki/Radiaci%C3%B3n_electromagn%C3%A9tica

Vibraciones y Ondas

<http://www.sociedadelainformacion.com/departfqtobarra/ondas/index.htm>

Ejemplos interactivos sobre la física de las ondas.

Calculadora para la Zona de Fresnel

<http://www.e-advento.com/cgi-bin/fresnel.main.cgi>

12. Declaración de Derechos de Propiedad Intelectual

Los materiales desarrollados en el marco del proyecto TRICALCAR utilizan una versión resumida del formato MMTK – Multimedia Training Kit. Han sido desarrollados para ser utilizados y compartidos libremente por instructores/as vinculados a proyectos de nuevas tecnologías para el desarrollo.

Todos los materiales están disponibles bajo una de las licencias Creative Commons <<http://creativecommons.org/>>. Estas licencias han sido desarrolladas con el propósito de promover y facilitar que se compartan materiales, pero reteniendo algunos de los derechos del autor sobre la propiedad intelectual.

Debido a que las organizaciones del Proyecto TRICALCAR que usan el formato MMTK para el desarrollo de sus materiales tienen diversas necesidades y trabajan en contextos diferentes, no se ha desarrollado una licencia única que cubra a todos los materiales. Para mayor claridad sobre los términos y condiciones en las que usted puede utilizar y redistribuir cada unidad temática, por favor verifique la declaración de derechos de propiedad intelectual incluida en cada una de ellas.

Provisiones de derechos de propiedad intelectual para esta unidad: Esta unidad temática se ha hecho disponible bajo los términos de la licencia **Atribución-No Comercial-Licenciamiento Recíproco**, bajo los siguientes términos:

- **Atribución.** Reconocer la autoría del material en los términos especificados por el propio autor o licenciante.
- **No comercial.** No puede utilizarse este material para fines comerciales.
- **Licenciamiento Recíproco.** Si altera, transforma o crea un material a partir de éste, sólo podrá distribuir el material resultante bajo una licencia igual a ésta.

Documento preparado para el taller de comunicaciones inalámbricas de Tshwane en Sudáfrica (c) 7th September 2005, Creative Commons Deed. Attribution-NonCommercial-ShareAlike 2.0 (c) 21 Abril 2007. Editado por Alberto Escudero Pascual IT, +46. Traducido por LaNeta.