

2.0 Introducción

En los últimos años las redes inalámbricas (WLAN, Wireless Local Area Network) han ganado muchos adeptos y popularidad en el mercado de la Telecomunicaciones. Las redes inalámbricas permiten a los usuarios acceder a información y recursos en tiempo real sin necesidad de estar físicamente en un sólo lugar. Con la utilización de las redes WLANs, está es por sí misma móvil, elimina la necesidad de usar cables, establece nuevas aplicaciones añadiendo flexibilidad a la red y lo más importante incrementa la productividad y eficiencia en las actividades diarias de la empresa, universidad o centro de ocio donde se implante esta tecnología. Un usuario dentro de una red inalámbrica puede transmitir y recibir voz, datos y video dentro de edificios, entre edificios o campus universitarios, en áreas metropolitanas e incluso en áreas muy alejadas a velocidades de 11Mbps a 54 Mbps¹.

En este capítulo estudiaremos todo lo referente a las transmisiones por radio, haciendo especial hincapié en las transmisiones inalámbricas a 2.4Ghz. Se estudiara de manera rápida los tipos de estándares para la banda ISM² y además los parámetros que influyen en la propagación de señales en espacio libre.

2.1 Reseña histórica de las transmisiones inalámbricas.

La primera red inalámbrica fue desarrollada por la Universidad de Hawai por el 1971 para enlazar los ordenadores de cuatro islas sin utilizar cables de teléfono. Tomaron más auge en los años 80, cuando la idea de compartir datos entre ordenadores se hizo más popular entre los usuarios. Las primeras transmisiones inalámbricas se realizaron a partir de *transceptores*³ de infrarrojos. Por desgracia esta idea era muy débil ya que se necesitaba visión directa y que no hubiera ningún obstáculo de por medio.

Desde entonces se pensó en otro tipo de transmisiones como son las transmisiones vía radio hacia los años 90. Sin embargo no llegaron a cuajar ya que eran tecnologías muy caras para su comercialización y su uso en entorno no empresariales, con el problema añadido de que las empresas de fabricación solo permitían su funcionamiento con productos de la misma marca, provocando una gran incompatibilidad de equipos. Fue entonces cuando nació el estándar **802.11** para las comunicaciones inalámbricas.

2.2 La Banda de 2.4GHz.

El estándar IEEE 802.11 esta englobado en la banda de frecuencias denominada **ISM** (*Industrial, Scientific and Medical*) localizada en torno a los 2.4Ghz. *Figura 2.0*

La banda de 2.4Ghz tiene un ancho de 83Mhz. En España a partir del 2002 ya están disponibles, al igual que en Europa todos los canales. Este ancho está

¹ **Mbps**: Mega bits por segundo. $1 \cdot 10^6$ bits por cada segundo.

² **ISM**: *Industrial, Scientific and Medical*.

³ **Transceptores**: transmisor-receptor.

comprendido entre 2.400MHz y 2.483MHz. La potencia máxima de transmisión viene definidas por los distintos organismos de regulación. En EEUU se define una potencia máxima de 1W, para Europa y España es de 100mW y para Japón es de 10mW.

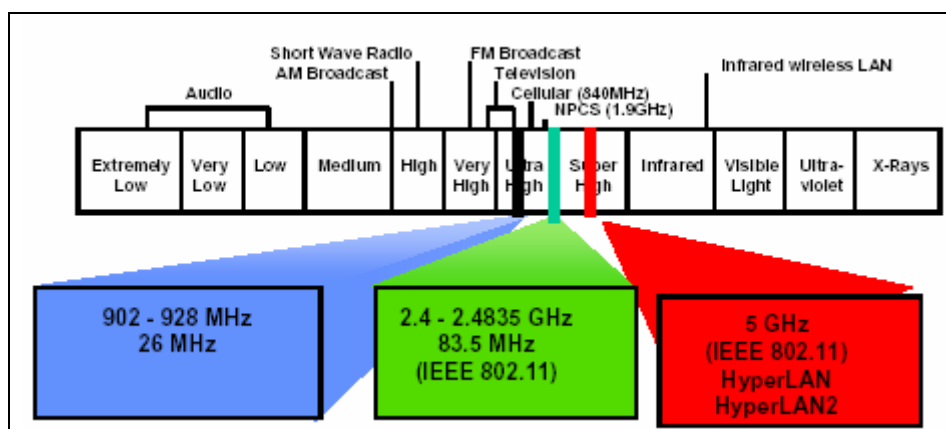


Figura 2.0: ISM (Frecuencias de uso sin licencia).

El comité IEEE⁴ optó por dejar abierto el tipo de nivel físico, reconociendo en el estándar tres posibles implementaciones, incompatibles entre sí. De los niveles físicos estandarizados dos se basan en acceso radioeléctrico por modulación de espectro ensanchado, uno de ellos de secuencia directa (*Direct Sequence Spread Spectrum*, DSSS), el segundo, utilización de la técnica de salto frecuencial (*Frequency Hopping Spread Spectrum*, FHSS), y la tercera implementación estandarizada, utiliza un nivel físico basado en tecnología de infrarrojos (IR). Ambos están definidos para trabajar en la banda de 2.4Ghz, y DSSS teniendo una variante en la banda de los 5Ghz, que consigue mayores velocidades de transmisión.

La Tabla 2.0. muestra los distintos canales en los que se divide la banda ISM. De los 14 existentes, España solo utiliza el canal 10 (2.457MHz) y el canal 11 (2.462MHz). Esta limitación puede imponer severas restricciones en cuanto al crecimiento en forma de capacidad por parte de estas redes.

Canal	Frecuencia	EE.UU.	Canadá	Europa	España	Francia	Japón
1	2.412 MHz	X	X	X	X	-	-
2	2.417 MHz	X	X	X	X	-	-
3	2.422 MHz	X	X	X	X	-	-
4	2.427 MHz	X	X	X	X	-	-
5	2.432 MHz	X	X	X	X	-	-
6	2.437 MHz	X	X	X	X	-	-
7	2.442 MHz	X	X	X	X	-	-
8	2.447 MHz	X	X	X	X	-	-
9	2.452 MHz	X	X	X	X	-	-
10	2.457 MHz	X	X	X	X	X	-
11	2.462 MHz	X	X	X	X	X	-
12	2.467 MHz	-	-	X	X	X	-
13	2.472 MHz	-	-	X	X	X	-
14	2.477 MHz	-	-	-	-	-	X

Tabla 2.0: Bandas de frecuencia del 802.11 por geografía.

⁴ IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

2.3 Estándares WLAN.

2.3.1 IEEE 802.11

Sobre el mes de Junio de 1997 se concluyó el estándar **IEEE 802.11**, definido por la organización *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) para las transmisiones inalámbricas.

Las primeras especificaciones eran relativamente lentas, siendo su velocidad de transmisión de 1 a 2 Mbps.

Hacia el 1999, la IEEE facilitó un nuevo estándar, **IEEE 802.11b**, en el que se aumentaba el rendimiento de las transmisiones a unos 11 Mbps.

A finales del 2002, apareció la marca registrada **WI-FI** (*Wireless Fidelity*), englobando el **802.11b** y otros estándares más rápidos como el **802.11a**. **WI-FI** es sinónimo del estándar IEEE "**802.11b**", protocolo de transmisión inalámbrica que logra alcanzar desde 2 Mbps hasta un máximo teórico de 11 Mbps. Este estándar fue creado por un grupo de fabricantes de dispositivos inalámbricos para mantener la compatibilidad entre sus productos y dar un grado de calidad a los productos *Wireless*.

La norma **IEEE 802.11** es un estándar en continua evolución, por lo que ha sufrido varias modificaciones y extensiones a lo largo de su corta vida, y es por ello que aun hoy en día van apareciendo nuevas especificaciones.

Este estándar no especifica una tecnología o implementación concretas, sino simplemente el nivel físico⁵ y el subnivel de control de acceso al medio⁶ (MAC), siguiendo la arquitectura de sistemas abiertos OSI/ISO.

No entraremos en el área telemática del estándar 802.11. pero sí nombraremos algunas características técnicas como podría ser la modulación de cada uno de los estándares y su finalidad.

- **IEEE 802.11**: Especificaciones para 1-2 Mbps en la banda de los 2.4GHz. usando salto de frecuencias (FHSS) o secuencia directa (DSSS).
- **IEEE 802.11b**: Extensión de 802.11 para proporcionar 11 Mbps usando DSSS.
- **Wi-Fi** (*Wireless Fidelity*): Término registrado promulgado por la WECA⁷ para certificar productos IEEE 802.11b capaces de inter operar con los de otros fabricantes.
- **IEEE 802.11a**: Extensión de 802.11 para proporcionar 54 Mbps usando OFDM.

⁵**Nivel Físico**: es el primero de los siete niveles del modelo OSI, y define las técnicas de codificación y modulación.

⁶**MAC**: define la forma en la que se va a acceder al medio físico para el intercambio de datos.

⁷**WECA**: alianza para crear y definir procedimientos para conseguir certificados de interoperabilidad y de cumplir las especificaciones, todo dentro del estándar llamado WiFi.

- **IEEE 802.11g:** Extensión de 802.11 para proporcionar 20-54 Mbps usando DSSS y OFDM. Es compatible hacia atrás con 802.11b. Tiene mayor alcance y menor consumo de potencia que 802.11a.
- **IEEE 802.11c:** Añade soporte MAC en 802.11b para operaciones de puente para el estándar 802.11.
- **IEEE 802.11d:** Define nuevos requerimientos para la capa física, como puede ser canales, secuencias de saltos y otros requerimientos para hacer funcionar 802.11 en otros países, donde no es posible implementarlo, puesto que no tienen 2.4Ghz libre o es más corto. Entre ellos España, por tener parte de la banda destinada a usos Militares.
- **IEEE 802.11e:** Mejora la capa MAC del 802.11 para que se pueda obtener una buena calidad de servicio, poder tener clases de servicio y mejorar los mecanismos de seguridad y autenticación. **IEEE 802.11f:** Ayuda a la interoperabilidad entre puntos de acceso.
- **IEEE 802.11g:** Consigue mejorar la tasa de transmisión, por encima de 20Mbps en la banda de 2.4Ghz, usando otras codificaciones.
- **IEEE 802.11h:** Mejora la capa física en la banda de 5Ghz para países europeos. Por tema de las licencias es imposible transmitir en esta banda en Europa, de ahí que estas investigaciones se centren en elaborar mecanismos de selección entre interiores y exteriores.
- **IEEE 802.11i:** Desarrolla nuevos mecanismos en el nivel MAC para obtener mayores prestaciones en cuanto a seguridad.

Estándar	Frecuencia portadora	Velocidad de datos	Descripción
802.11a	5.1-5.2Ghz 5.2-5.3Ghz 5.7-5.8Ghz	54 Mbps	Pot Max 40mW Pot Max 250mW Pot Max 800mW (EE.UU)
802.11b	2.4-2.485Ghz	11 Mbps	100mW
802.11d	N/D		Múltiples dominios reguladores.
802.11e	N/D	N/D	Calidad de servicio
802.11f	N/D	N/D	Protocolo de conexión entre AP's.
802.11g	2.4-2.485Ghz	36 o 54 Mbps	
802.11h	N/D	N/D	Selección dinámica de frecuencias (DFS).
802.11i	N/D	N/D	Seguridad.

Tabla 2.1: Resumen 802.11

2.3.2 Infrarrojos ($\lambda = 850-950 \text{ nm}$).

Se utiliza para distancias muy cortas y cuando no hay obstáculos entre el emisor y el receptor (no puede atravesar objetos opacos), pero pueden reflejarse en determinadas superficies. Su velocidad de transmisión puede ser de 1 Mbps ó 2 Mbps. Su longitud de onda oscila entre 850 y 950 nm es decir, entre los $3,153 \cdot 10^{14}$ y $5,520 \cdot 10^{14}$ Hz.

Los sistemas que funcionan mediante infrarrojos se clasifican según el ángulo de apertura con el que se emite la información en el emisor. De esta clasificación resultan varios sistemas:

- **Sistemas de corta apertura:** (de haz dirigido o de visibilidad directa): Que funcionan de manera similar a los mandos a distancia de las televisiones. Esto supone que el emisor y el receptor tienen que estar orientados adecuadamente antes de empezar a transmitir la información.
- **Sistemas de gran apertura:** Reflejados o de difusión que radian tal y como lo hace una bombilla, permitiendo el intercambio de información en un rango más amplio. La norma 802.11 especifica dos modulaciones para esta tecnología.

Esta tecnología se aplica típicamente en entornos de interior para implementar enlaces punto a punto de corto alcance o redes locales en entornos muy localizados como puede ser una aula específica o un laboratorio.

2.3.3 Bluetooth.

Bluetooth es un estándar de comunicaciones para redes inalámbricas de uso personales (Wireless Personal Area Networks) desarrollada por la compañía sueca Ericsson, permitiendo la interconexión de múltiple variedad de dispositivos. Esta tecnología está orientada a conectar cualquier dispositivo electrónico: ordenadores, PDA, teléfonos, electrodomésticos, etc. en pequeños radios de cobertura conformando Redes de Área Personal (PAN), capaces de transmitir voz y datos. El rango de cobertura es de 10m y la transferencia es de 1 Mbps aproximadamente. Permite comunicaciones síncronas (voz) y asíncronas (datos).

Bluetooth es propuesto por Ericsson en 1994, pensando en una tecnología de transmisión inalámbrica barata, robusta, flexible y que consumiera poco. Es un estándar libre. Bluetooth nace como una alternativa fuerte a las redes inalámbricas personales (WPAN). No provee todas las características de las redes 802.11. Bluetooth también nace como una alternativa muy competitiva a IR. Es una tecnología de bajo coste. En cuanto a sus características, son aparatos de pequeño tamaño, bajo consumo y transferencia hasta 721kbps. El rango de frecuencias que utiliza esta en la banda ISM (Médico-Científica Internacional) en 2'45Ghz. Este requisito permite la compatibilidad con los sistemas de radio actual y la disponibilidad de unas comunicaciones de calidad. En España su uso fue autorizado por el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias.

2.3.4 HomeRF.

HomeRF es otra organización que ha desarrollado sus propios estándares las redes inalámbricas. HomeRF ha sido desarrollado por el grupo de trabajo *Home Radio Frequency*, el cual está conformado por más de 50 compañías líderes en el ámbito mundial en las áreas de redes, periféricos, comunicaciones, software, semiconductores, etc. Este grupo fue fundado en marzo de 1988 para promover de manera masiva dispositivos de voz, datos y video alrededor de los hogares de manera inalámbrica. En el otoño del 2001, se anunció la formación un grupo de trabajo europeo de HomeRF enfocado hacia el mercado europeo. HomeRF es la tecnología que compite directamente con los productos de la IEEE 802.11b y Bluetooth en la banda de 2.4GHz. La velocidad máxima de HomeRF es 10 Mbps, ideal para las aplicaciones caseras, aunque se manejan otras velocidades de 5, 1.6 y 0.8 Mbps. Según el grupo de trabajo *Home Radio Frequency*, HomeRF es más seguro, los dispositivos consumen menos potencia que los productos de las tecnologías contrincantes, además de permitir aplicaciones para telefonía y video.

2.3.5 HiperLAN2

HiperLAN2 es un estándar desarrollado por el ETSI (*European Telecommunications Standard Institute*) para redes WLAN. Destaca por:

- Alta velocidad de transmisión
- Búsqueda automática de frecuencia
- Orientado a conexión
- Seguridad. Movilidad
- Calidad de servicio (QoS).
- Bajo consumo

HiperLAN2 ofrece una velocidad de transmisión de 54Mbps, equiparable a las velocidades de las actuales LAN. Para conseguir estas velocidades, la tecnología HiperLAN2 hace uso de OFDM (*Orthogonal Frequency Digital Multiplexing*) para transmitir las señales. OFDM es muy eficiente en entornos de trabajo como oficinas, donde las señales de radio son reflejadas en varios puntos, llegando al receptor con tiempos de propagación diferentes. En las redes HiperLAN2, no es necesaria la planificación manual de las frecuencias como en las redes celulares GSM. Los puntos de acceso (APs)⁸ seleccionan automáticamente el canal de radio adecuado para las transmisiones, basándose en la escucha de los puntos de acceso vecinos, evitando posibles interferencias.

2.4 Transmisiones Inalámbricas de banda ancha.

No es el tema de este proyecto tratar de la modulación, de-modulación, y sus tratamiento para la transmisión, si no la fabricación de una antena para WLAN, pero creemos conveniente introducir el tema para tener una ligera idea de cómo se pueden transmitir señales a tan alta frecuencia y velocidad.

⁸ **APs:** Dispositivo físico, que permite al usuario acceder a una red inalámbrica.

Los equipos inalámbricos emplean ondas de radio en sus comunicaciones, de esta manera, se puede llevar la información de un punto a otro sin necesidad de disponer de una instalación para ello, evitando posibles obstáculos entre emisor y receptor. Las ondas de radio son normalmente referidas a portadoras de radio ya que éstas únicamente realizan la función de llevar la energía a un receptor remoto. Los datos a transmitir se superponen a la portadora (modulación) de radio y el receptor debe extraerlos de ésta (demodulación).

Las tecnologías empleadas en la transmisión en banda ancha se basan en la modulación por el espectro ensanchado (*Spread Spectrum Modulation*). La técnica de espectro ensanchado consiste en diseminar la potencia de la señal en una banda ancha de frecuencias, consiguiendo ganar rendimiento en la relación señal/ruido, a costa de sacrificar ancho de banda. Con esta técnica se consiguen señales menos susceptibles al ruido eléctrico que con las modulaciones tradicionales de radio. Dado que las señales de radio comunes tienen un espectro estrecho solo interferirán en una pequeña porción de la señal “esparcida en el espectro”, obteniendo como resultado una menor interferencia y menores errores en la transmisión.

En 1985 la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC – *Federal Communications Commission*), en un intento de fomentar los productos inalámbricos, modificó la regulación del radio-espectro. Esta modificación autorizaba a los productos de redes inalámbricas a operar en las bandas de Industria, Científicas y Médicas (ISM – *Industry, Scientific and Medical*) mediante modulación de “esparcimiento del espectro” y con una potencia de salida de hasta 1 vatio. Las bandas ISM son:

- 902-928 MHz
- 2.4-2.4835 GHz
- 5.725-5.850 GHz

Para poder vender productos de sistemas LAN inalámbricos en un país particular, el fabricante debe asegurar la certificación por la Agencia Reguladora de radio-transmisión correspondiente.

Existen dos tecnologías de radio-transmisión que utilizan la técnica de espectro ensanchado empleadas en las transmisiones en banda ancha: FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*) y DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*). Ambas se basan en distintos fundamentos por lo que una no puede ínter operar con la otra.

2.4.1 FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*).

Esta técnica consiste en tomar la señal de transmisión y la modularla con una señal portadora que “salta” (hops) de frecuencia en frecuencia, dentro del ancho de la banda asignada, en función del tiempo. El cambio periódico de frecuencia de la portadora, reduce la interferencia producida por otra señal originada por un sistema de banda estrecha, afectando solo si ambas señales se transmiten en la misma frecuencia y en el mismo momento.

Un patrón de salto (hopping code), determina las frecuencias por las que se transmitirá y el orden de uso de estas. Para recibir correctamente la señal, el receptor debe disponer del mismo patrón de salto que el emisor y escuchar la señal en la frecuencia y momento correcto. La regulación impone a los fabricantes el uso de al menos 75 frecuencias distintas para la transmisión de un canal con un tiempo máximo de 400ms de uso por frecuencia.

Es posible por tanto, disponer de varios equipos en empleando la misma banda de frecuencia sin que se interfieran, asumiendo que cada uno de ellos emplea un patrón de salto diferente. Dos patrones de saltos que nunca emplean la misma frecuencia se dice que son ortogonales. La imposición de al menos 75 frecuencias distintas en una banda, permitiendo tener varios canales que no se interfieran.

A continuación se detallan algunas características de ésta técnica de modulación con respecto a DSSS:

- Menor coste.
- Consumo menor.
- Menor cobertura.
- Tolerante a interferencias de señales.

2.4.2 DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*).

Esta técnica consiste en la combinación de la señal a transmitir en una secuencia de bits a mayor velocidad de transmisión. A esta secuencia se la conoce como chip ping code o “código de troceado”, y no es más que un patrón redundante de bits asignado a cada bit a enviar, que divide la información del usuario acorde a un “ratio de esparcimiento” (Spread Ratio). Cuando se desea enviar la información, realmente se transmiten los códigos correspondientes. Por ejemplo si el bit a enviar es 1 la secuencia que se transmite es 00010011100. Si uno o más bits del patrón sufren interferencias durante la transmisión, el receptor podría reconstruir el dato enviado, gracias a la redundancia del chip ping code.

A continuación se detallan algunas características de ésta técnica de modulación con respecto a FHSS:

- Coste superior.
- Consumo superior.
- Mayor velocidad de transmisión.
- Mayor cobertura.
- Menor número de canales.

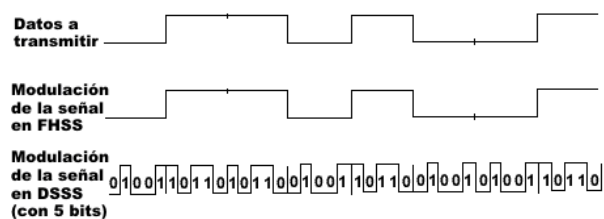


Figura 2.1: Modulación FHSS y DSSS.

2.4.3 OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*)

OFDM es una tecnología de modulación digital, una forma especial de modulación multi-canal considerada la piedra angular de la próxima generación de productos y servicios de radio frecuencia de alta velocidad para uso tanto personal como corporativo. La técnica de espectro disperso de OFDM distribuye los datos en un gran número de canales que están espaciados entre sí en distintas frecuencias precisas. Ese espaciado evita que los demoduladores vean frecuencias distintas a las suyas propias.

Una de las ventajas de OFDM es que consigue una alta resistencia a las interferencias producidas por las ondas reflejadas en los objetos del entorno (eco o *multipath*).

Actualmente OFDM no sólo se usa en las redes inalámbricas LAN 802.11a, sino en las 802.11g, en comunicaciones de alta velocidad por vía telefónica como las ADSL y en difusión de señales de televisión digital terrestre en Europa, Japón y Australia.

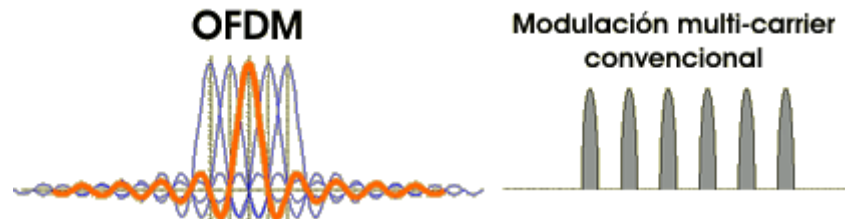


Figura 2.2 El espectro de OFDM se traslapa.

En la siguiente tabla (**Tabla 2.2**) se resumen las características de cada tecnología para tener una visión más general de cada estándar.

Características técnicas	Bluetooth	HomeRF	HiperLAN 2	802.11b	802.11a
Espectro	2.4 GHz	2.4 GHz	5 GHz	2.4 GHz	5 GHz
Velocidad máx.	1 Mbps	2 Mbps	54 Mbps	11 Mbps	54 Mbps
Redes	PAN	WLAN	WLAN	WLAN	WLAN
Voy y datos	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Selección de frecuencias.	FHSS	FHSS	DSSS	DSSS	OFDM

Tabla 2.2 Comparativa de estándares inalámbricos.

2.5 Propagación de señales de radiofrecuencia a 2.4Ghz.

Cuando una onda electromagnética se propaga en el vacío, su trayectoria puede describirse como un rayo directo que une el transmisor y el receptor. Para calcular las pérdidas de propagación por espacio libre podemos emplear la ecuación de transmisión de Friis.

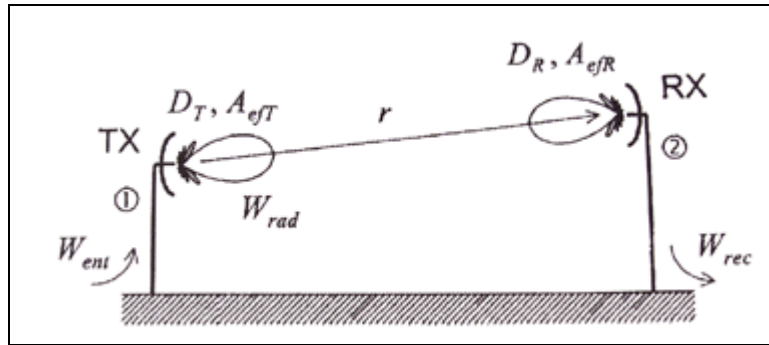


Figura 2.3 Esquema de Propagación.

El espacio libre se define como un medio dieléctrico homogéneo, isótropo y alejado de cualquier obstáculo. Como podemos comprobar en nuestro entorno, esta circunstancia se da pocas veces. La superficie de la tierra no es uniforme y además la tierra presenta una curvatura. De cualquier forma si las antenas están dispuestas de forma conveniente, sin ningún obstáculo intermedio, podemos considerar que la única atenuación producida es la del espacio libre.

El suelo, la troposfera y la ionosfera son los responsables de que el modelo ideal de propagación en espacio libre, descrito en la ecuación de transmisión de Friis no sea correcto en la mayoría de los casos reales. La orografía del suelo y sus características morfológicas, que condicionan sus propiedades eléctricas, afectan a la propagación de las ondas electromagnéticas.

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{G_t \cdot G_r}{\left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)^2}$$

donde:

P_r : es la potencia recibida (mW).

P_t : es la potencia transmitida (mW).

G_t : es la ganancia del transmisor.

G_r : es la ganancia del receptor.

r : es la distancia que separa el transmisor del receptor (m).

λ : es la lambda de trabajo.

Para calcular las pérdidas por espacio libre de la ecuación anterior se puede pasar a la escala logarítmica, así podemos escribir:

$$\left(\frac{P_r}{P_t}\right)(dBm) = +G_t(dB) + G_r(dB) - 20\log\left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right) = +G_t(dB) + G_r(dB) - 20\log(4\pi) + 20\log\left(\frac{r}{\lambda}\right)$$

$$\left(\frac{P_r}{P_t}\right)(dBm) = G_t(dB) + G_r(dB) - 21,98 + 20\log(r) - 20\log(\lambda)$$

para nuestro caso, es decir, para los 2.442MHz, que es la frecuencia del canal 7 para WLAN (canal central de la banda), $\lambda = c/f$ donde $c = 3 \cdot 10^8$ y $f = 2.442 \cdot 10^6$, $\lambda = 0,122$ m. y

suponiendo que la Ganancia de las antenas, tanto transmisora como receptora es igual a la de una antena isotrópica (0dB en unidades logarítmicas) la formula anterior quedara de la siguiente manera:

$$\left(\frac{P_r}{P_t}\right)(dBm) = -21,98 + 20\log(r) - 20\log(0,122) = -21,98 - 18,21 - 20\log(r)$$

$$\left(\frac{P_r}{P_t}\right)(dBm) = -40,19 - 20\log(r)$$

Conforme aumentamos la distancia, el nivel de señal decrece en potencia.

El modelo de propagación en espacio libre sólo es válido para casos donde las antenas emisora y receptora estén lo bastante próximas como para que la distancia entre ellas sea despreciable frente a cualquier objeto en el que pueda reflejarse la señal.

La transmisión de radio en exteriores de campo abierto está normalmente referenciada como una propagación en visión directa (LOS) (figura 2.4). Las señales se propagan desde el transmisor hasta el receptor por dos trayectorias diferentes, un rayo directo y uno reflejado desde el suelo. La diferencia de tiempo entre estos dos rayos de llegada es pequeña. El modelo de propagación es simple bajo estas condiciones y la potencia de llegada al receptor decae proporcionalmente al cuadrado de la distancia entre el transmisor y el receptor. Para una potencia de transmisión dada, el rango está simplemente determinado por la sensibilidad del receptor.

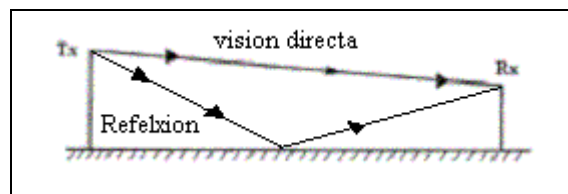


Figura 2.4. Visión directa y refección de una señal transmitida.

2.5.1 Mecanismos de propagación.

Las interacciones de las ondas con varios objetos en el ambiente, así como la tierra, edificios, vegetación, farolas, etc. están comúnmente dirigidos a los mecanismos de propagación. Los principales mecanismos de propagación están brevemente descritos a continuación.

2.5.2 Reflexión.

La reflexión tiene lugar cuando una onda electromagnética propagada incide sobre un objeto que tiene dimensiones mayores que la longitud de onda propagada.

La señal propagada choca contra una superficie, siendo esta señal absorbida, reflejada o una combinación de ambas. Esta reacción depende de las propiedades de la señal y de las propiedades físicas del material. Las propiedades físicas son la geometría de la superficie, la textura y el material del que esté compuesta. Las propiedades de la señal son el ángulo incidente de llegada, la orientación y la longitud de onda.

2.5.2.1 Reflexión especular: Cuando una onda plana se propaga en un medio y se encuentra un plano, un límite finito con otro medio con diferentes propiedades electromagnéticas, será parcialmente reflejada hacia el primer medio, y parcialmente transmitida (refractada) dentro del segundo medio. La propiedad básica de la reflexión especular es que la dirección de la onda reflejada es simétrica a la dirección de la onda incidente respecto a la superficie normal. Las magnitudes de las ondas reflejadas y refractadas pueden ser calculadas a partir de las fórmulas de Fresnel. Los coeficientes de reflexión y refracción son diferentes para las polarizaciones paralelas y perpendiculares al plano conteniendo el límite normal y la dirección de propagación, la cual puede llevar a un cambio de polarización de la onda. Superficies infinitas no existen en la realidad, y en la práctica es suficiente que la superficie sea mayor que la sección de cruce de la primera zona Fresnel.

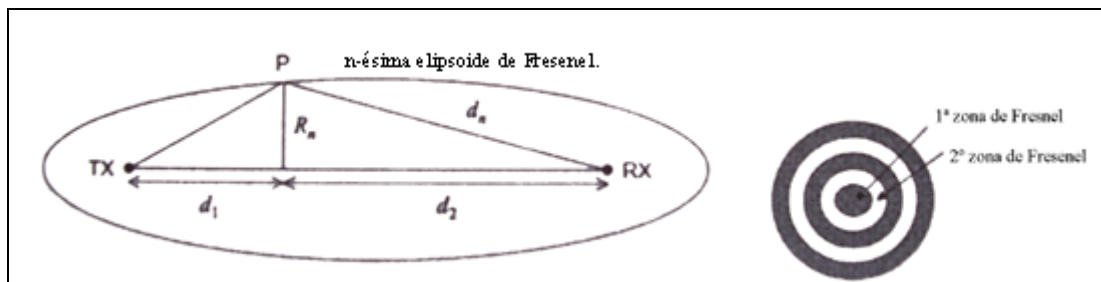


Figura 2.3: n-esima elipsoide de Fresnel.

$$TxPRx - TxRx = d_n - (d_1 + d_2) = n \frac{\lambda}{2} \text{ para } n=1,2,3 \dots$$

$$R_n = \sqrt{n\lambda \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \text{ (Radio de la n-esima zona de Fresnel)}$$

2.5.2.2 Reflexión difusa: Una superficie tosca presenta distintas caras a la onda incidente, y el mecanismo de reflexión es más disperso. Las propiedades son impredecibles debido a la naturaleza casual de la superficie. La contribución de las propiedades difusas depende de la rugosidad de la superficie y del ángulo de incidencia. El criterio de Rayleigh para las superficies rugosas viene definido por:

$$C = \frac{4\pi\sigma\alpha}{\cos \lambda}$$

Donde:

σ : Desviación estándar de las irregularidades de la superficie.

α : Ángulo de incidencia respecto a la superficie normal.

λ : Longitud de onda.

La superficie es lisa y la reflexión especular domina si $C < 0.1$. Para $C > 10$ la reflexión es mayormente difusa y la onda reflejada especular es suficientemente pequeña para ser despreciada. A frecuencias próximas a 2GHz, la reflexión especular domina si la superficie rugosa es menor de 1mm para una incidencia normal o 7cm para una incidencia casi rugosa ($\alpha=89^\circ$). Podemos concluir que en un rango de frecuencia alrededor de 2GHz las reflexiones desde la tierra o desde paredes de edificios (exteriores) no son ni puramente especulares ni completamente difusas.

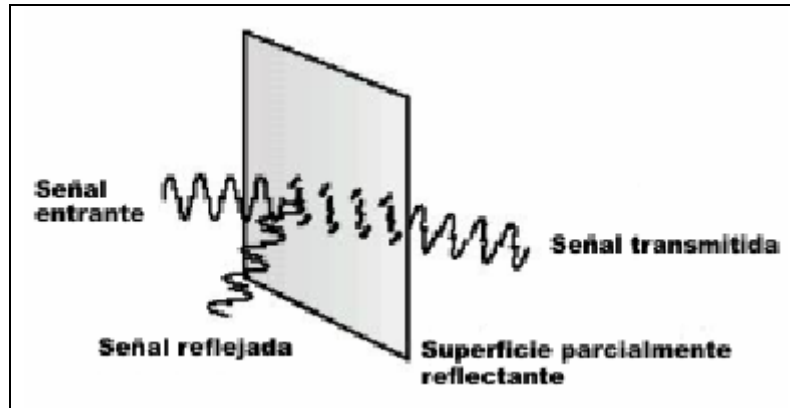


Figura 2.4. Reflexión y Transmisión de una señal incidente.

2.5.3 Difracción

La difracción ocurre cuando la trayectoria de radio entre el transmisor y el receptor está obstruida por una superficie que tiene irregularidades agudas (bordes). Las ondas secundarias resultantes desde la superficie obstructora están presentes a través del espacio e incluso detrás del obstáculo, dando lugar a una flexión de ondas alrededor del obstáculo, al igual que cuando no existe una trayectoria de línea de visión entre el transmisor y el receptor. A alta frecuencia, la difracción como la reflexión depende de la geometría del objeto así como la amplitud, la fase, y la polarización de la onda incidente al punto de difracción.

Un frente de onda difractado se forma cuando la señal transmitida incidente es obstruida por ángulos cortantes en la trayectoria (ver figura 2.5).

La difracción ocurre cuando los obstáculos son impenetrables por las ondas de radio. Basado en el principio de Huygens⁹, las ondas secundarias son formadas por detrás del cuerpo obstructor. Los ambientes de interior contienen muchos tipos de estos ángulos y aperturas, ambos orientados en los planos vertical y horizontal. Por ello la señal difractada resultante depende de la geometría del ángulo, de la orientación espacial, y las dependencias de las propiedades de la señal incidente, tales como la

⁹ **Principio de Huygens:** cuando un tren de ondas llega a una pared en la que existe una rejilla de diámetro comparable a la longitud de onda, cada punto del frente formado en el orificio se convierte en un nuevo foco emisor de ondas elementales.

amplitud, la fase y la polarización. El resultado de la difracción de una onda en un obstáculo es que el frente de onda se inclina alrededor y detrás del obstáculo. En la teoría de difracción de campos eléctricos sobre corte de cuchillo, la pérdida en dB se calcula siguiendo la siguiente fórmula:

$$A(v) \approx \begin{cases} 6,02 + 9,11v - 1,27v^2 & si \leq 2,4 \\ 12,593 + 20 \log v & si > 2,4 \end{cases}$$

donde:

$$v = \sqrt{\frac{2d}{\lambda} \tan \alpha \tan \beta} = H \sqrt{\frac{2d}{d_t d_r \lambda}}$$



Figura 2.5: Fenómeno de difracción y esquema de transmisión.

Cuando la trayectoria desde el transmisor hasta el receptor está sujeta a más de un obstáculo, o a más de una esquina, la pérdida total de difracción puede ser estimada añadiendo las pérdidas en dB de todos los ángulos.

Debido a que en la realidad solo existen superficies finitas, también necesitan ser considerados los ángulos y las esquinas. La difracción puede ser analizada basándose en el principio de Huygens el cual indica que cada elemento de un frente de onda puede ser considerado como el centro de una nueva onda esférica y que la posición del frente de onda es la envoltura de cada una de las ondas esféricas. Los coeficientes de difracción complejos para rayos separados pueden ser calculados a partir de la teoría uniforme de difracción. En contraste a la reflexión, un único rayo incidente sobre una cuña a un ángulo α sobre la esquina produce un cono de rayos difractados, siendo el semiángulo del cono igual a α .

2.5.3 Dispersión

La dispersión ocurre cuando el medio por el cual viaja la onda está formado por objetos con dimensiones pequeñas comparadas a la longitud de onda, y donde hay un gran número de obstáculos por volumen de unidad. Las ondas dispersadas son producidas por las superficies ásperas, objetos pequeños, o por otras irregularidades en el canal. En la práctica, el follaje, las señales de tráfico, y las farolas inducen a la dispersión en un sistema de comunicaciones móvil.

La dispersión es un proceso de interacción general entre las ondas electromagnéticas y varios objetos. Regularmente se trata de objetos de gran tamaño comparados con la longitud de onda. En cambio, pequeños e irregulares objetos, como

árboles, farolas o irregularidades en paredes de edificios, están considerados como dispersores. La dispersión provoca una energía que será radiada en numerosas direcciones diferentes.

Si hay muchos objetos en la trayectoria de la señal, y los objetos son relativamente pequeños comparados con la longitud de onda de la señal, entonces el frente de onda propagado se dividirá en muchas direcciones. La señal resultante se dispersará en todas las direcciones añadiéndose a las interferencias constructivas y destructivas de la señal. Además, los materiales de construcción tales como una canalización eléctrica y cañerías de plomo pueden aumentar el efecto de dispersión. Gráficamente podríamos describirlo del siguiente modo: los objetos mucho más pequeños que la longitud de onda desaparecen de la vista. Por ejemplo, para radio FM a una frecuencia de 100Mhz ($\lambda = 3\text{m}$) la señal no se ve afectada por los coches o las personas, pero en cambio sufre reflexiones y difracción en los edificios. Otro ejemplo sería el siguiente: si llenásemos un edificio con esferas metálicas (rodamientos) de 2cm de diámetro, a una frecuencia de 5.2GHz tendríamos una dispersión 10 veces superior que a frecuencia de 2.44GHz.

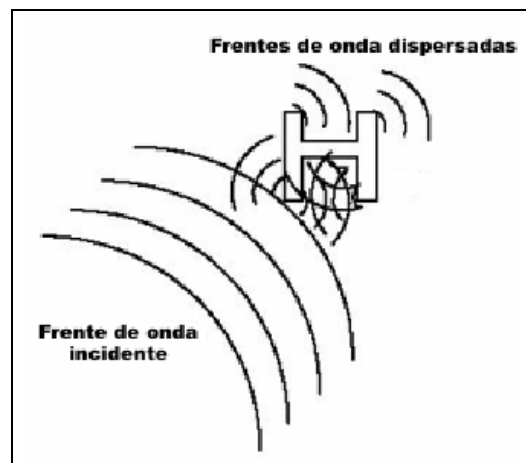


Figura 2.6. Dispersión de una señal transmitida.

2.5.4 Multicamino

El canal de radio en interiores, está caracterizado por la recepción multidireccional. Consiste en que la señal ofrecida al receptor está compuesta no solamente de ondas de radio directas a la línea de visión entre el transmisor y el receptor (*line of sight* LOS), sino también de una gran cantidad de ondas de radio reflejadas.

Estas ondas reflejadas interfieren con la onda directa, que causa la degradación significativa del funcionamiento de la red. Una red inalámbrica tiene que ser diseñada de tal manera que el efecto nocivo de estas reflexiones sea reducido al mínimo. La señal transmitida desde la base alcanza los receptores de radio a través de una o más ondas principales. Estas ondas principales consisten en un rayo de visión directa y numerosos rayos reflejados o dispersados por estructuras principales tales como paredes exteriores, suelos, etc. La onda LOS puede ser atenuada por la estructura hasta una extensión que la hace indetectable.

Las ondas principales se disuelven en el entorno debido a la dispersión por la estructura local y el mobiliario. Las trayectorias resultantes para cada una de las ondas principales llegan con muchos pequeños retardos, pero tienen diferentes valores de fase debido a las diferentes longitudes de la trayectoria. El número de las trayectorias distinguidas en una medida hecha y en un punto dado del espacio dependen de la forma y la estructura del edificio.

En el mundo real, el multicamino tiene lugar cuando hay más de una trayectoria disponible para la propagación de la señal de radio. Los fenómenos de reflexión, difracción y dispersión dan lugar a las trayectorias de radio adicionales de propagación más allá de la trayectoria óptica directa entre el radiotransmisor y el receptor.

Los niveles reales de la señal reflejada también dependen de la geometría del entorno. El multicamino ocurre cuando existen múltiples trayectorias de propagación de la señal, causadas por cualquier fenómeno; entre ellos el nivel real recibido de la señal es la suma de todas las señales incidentes desde cualquier dirección o ángulo de llegada. Algunas señales ayudarán a la trayectoria directa, mientras que otras señales restarán del recorrido directo de la señal.

Existen dos clases de multicamino:

- **Multicamino especular:** presentándose por reflexiones discretas, coherentes desde superficies de metal liso.
- **Multicamino difuso:** presentándose de las fuentes de la difracción (el rayo visible de la luz del sol de un mar entrecortado es un ejemplo de multicamino difuso).

Ambas formas de multicamino son malas para las comunicaciones por radio. El multicamino difuso proporciona un tipo de nivel de ruido de fondo de interferencia, mientras que el multicamino especular puede causar interrupciones en la señal o puntos muertos de radio dentro de un edificio. Este problema es especialmente difícil en callejones subterráneos, túneles y habitaciones pequeñas. El funcionamiento apropiado del acoplamiento de la comunicación por radio requiere que el multicamino sea reducido al mínimo o eliminado.

El multicamino, como su nombre implica, es un fenómeno por medio del cual las señales de radio viajan en más de una ruta entre el transmisor y el receptor. Esto se muestra en el **Figura 2.7** donde hay dos trayectorias, un camino con línea de visión (camino 1) y una trayectoria reflejada (camino 2).

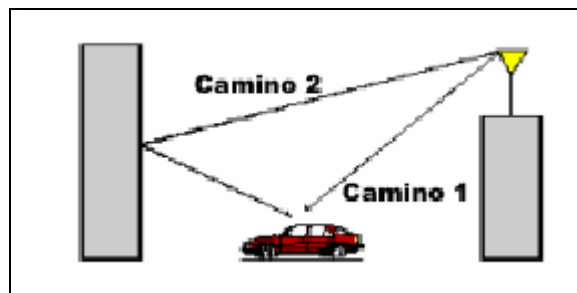


Figura 2.7: Multicamino de señales.

Debido a que el camino 2 sigue una distancia mayor, la información de la señal que viaja a lo largo de esta trayectoria estará atrasada en relación con la del camino 1. Esto puede resultar en los llamados desvanecimientos selectivos de frecuencia por los cuales, a ciertas frecuencias, la señal puede atenuarse o desaparecer. Esto puede verse en la **Figura 2.8.** en la cual hay dos señales sinusoidales, una que viaja a lo largo del camino 1 (señal 1) y la otra que lo hace por el camino 2 (señal 2). Las dos señales parecen las mismas y tienen la misma amplitud, pero la señal 2 está retrasada respecto a la 1; es por ello que tiene una diferencia de fase en relación a ésta. En el receptor, estas dos señales son sumadas para producir la señal mostrada abajo. La suma resultante, en este caso, es una señal que posee una menor amplitud que cualquiera de las dos señales individuales, dando lugar a una atenuación de la señal recibida. Si las dos señales se encuentran en fase, la señal recibida resultante será mayor que cualquiera de las señales individuales (llegadas desde los dos caminos diferentes).

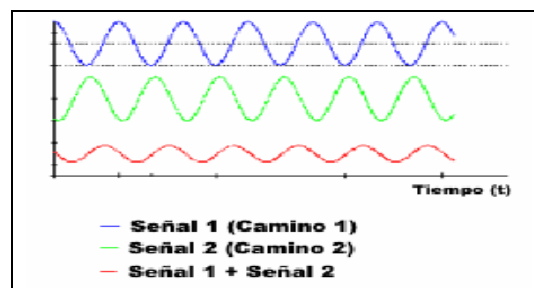


Figura 2.8. Suma destructiva de señales.

Si el receptor se mueve, las longitudes de las trayectorias variarán en relación a cada una de las otras y, como consecuencia, la fase cambiará en relación a cada una de las señales llegadas desde los diferentes caminos. Esto tiene como resultado una fluctuación de la amplitud de la señal recibida. Para señales de banda estrecha, este decaimiento de la potencia puede resultar en una pérdida total de la señal (dependiendo del grado de decaimiento y de la sensibilidad del receptor).

El multicamino se relaciona con los modelos de propagación y la pérdida de camino emplea teorías estocásticas y funciones de distribución de probabilidad. Las variaciones de la señal en un edificio donde no hay trayectorias con línea de visión clara entre receptor y transmisor se pueden aproximar por la distribución Rayleigh. Para receptores y transmisores que tienen trayectorias con líneas de visión, se utiliza la distribución Rayleigh.

El multicamino introduce variaciones casuales en la amplitud de la señal de recepción por encima de un ancho de banda de frecuencia. Los efectos multicamino también varían dependiendo de la situación de la antena así como del tipo de antena utilizada. Pueden ocurrir variaciones de más de 40dB. El desvanecimiento de la señal puede ser muy rápido o muy lento. Éste depende del movimiento de la fuente y de los efectos de propagación manifestados en la antena receptora. Con respecto a las zonas interiores, los efectos de desvanecimiento están causados por actividades humanas y normalmente exhiben variaciones rápidas y lentas. Algunas veces la oscilación de ventiladores con hojas metálicas causa rápidos efectos de desvanecimiento.