



UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS  
VERITATE SOLA NOBIS IMPONETUR VIRILISTOGA. 1948

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

*Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones*

TRABAJO DE DIPLOMA

***“CÁLCULO DE COBERTURA EN  
REDES INALÁMBRICAS DE ÁREA LOCAL”***

**Autor: Ariel García Amores**

**Tutor: MSc. David Beltrán Casanova**

**Santa Clara**

**Curso 2003 – 2004**

**“AÑO DEL 45 ANIVERSARIO DEL TRIUNFO DE LA REVOLUCIÓN”**



**UNIVERSIDAD CENTRAL “Marta Abreu” DE LAS VILLAS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

***Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones***



**TRABAJO DE DIPLOMA**

***“CÁLCULO DE COBERTURA EN  
REDES INALÁMBRICAS DE ÁREA LOCAL”***

**Autor: Ariel García Amores**

**Tutor: MSc. David Beltrán Casanova**

**Santa Clara**

**Curso 2003 – 2004**

**“AÑO DEL 45 ANIVERSARIO DEL TRIUNFO DE LA REVOLUCIÓN”**



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Telecomunicaciones y Electrónica autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

---

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

---

Firma del Autor

---

Firma del Jefe de Departamento  
donde se defiende el trabajo

---

Firma del Responsable de  
Información Científico-Técnica

*Pensamiento*



*“... Todo hombre tiene el deber de cultivar  
su inteligencia  
por respeto a sí propio y al mundo...”*

*José Martí*

# *Agradecimientos*



## Agradecimientos

---

---

*Deseo agradecerles, en especial, a mis padres por la inmensa confianza que han depositado en mí, y con ellos a toda la familia, de la que tanto apoyo incondicional he recibido. A todos y cada uno de ellos, llegue el más cálido y sincero de los agradecimientos.*

*A mis amigos, que tan significativo papel desempeñaron en mi superación humana, a los que todavía quedan y a los que ya se han ido, me recuerden o no, porque aún así, siguen presentes como el primer día. A todos, todos ellos, por los tan especiales momentos compartidos y los que aún faltan.*

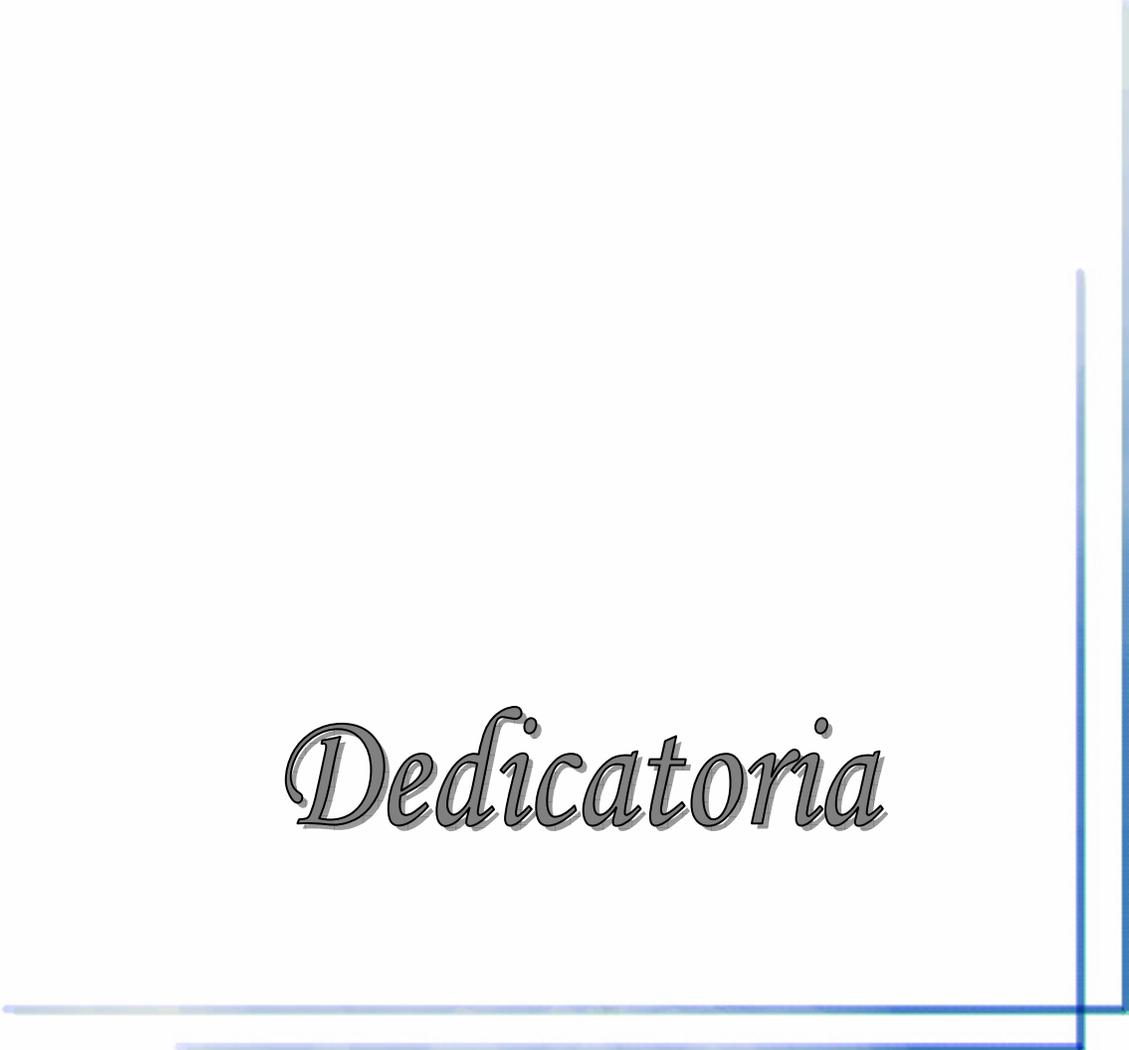
*A mis viejos y viejas, de cariño, porque me han mostrado el verdadero valor de la juventud.*

*A Pa', que aunque no está presente, esté donde esté, recuerde que aún así, lo llevo conmigo.*

*A mi tutor, por ser más que profesor, un amigo...*

*Desde mi corazón a todos, porque aunque sus nombres no estén escritos aquí, si han quedado grabados en él.*

# *Dedicatoria*



## *Dedicatoria*

---

---

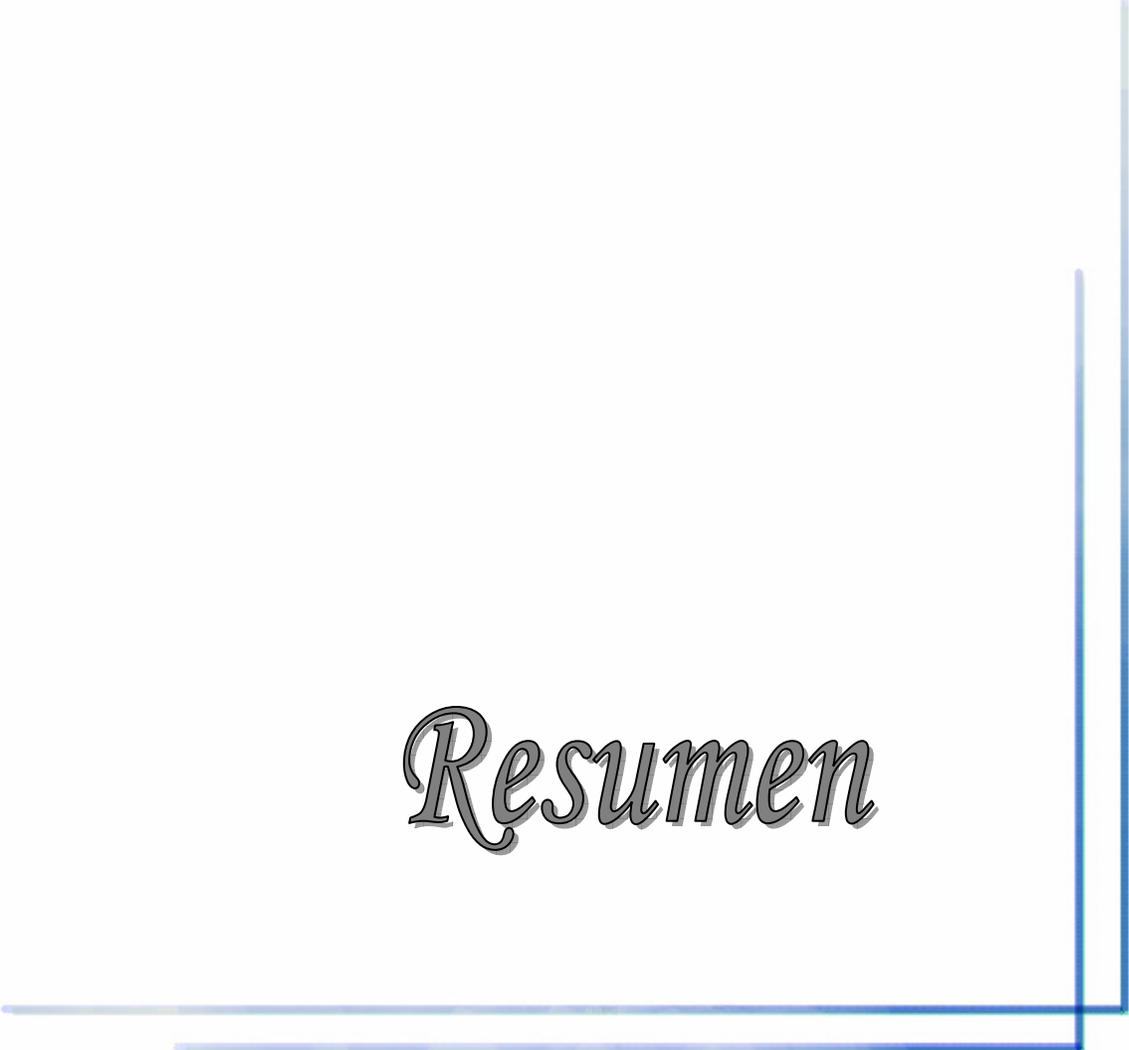
*A quienes anteriormente correspondí con los agradecimientos... A todos ellos dedico este, el fruto de nuestros esfuerzos.*

*A mis profesores, de quienes tanto apoyo incondicional he recibido, les obsequio, modestamente hoy, el resultado de sus dedicaciones.*

*A mi Universidad, la que consideré mi hogar en cinco años de estudios, a quien debo los mejores años de mi vida...*

*En fin, llegue a todos, mi más sincero homenaje...*

# *Resumen*



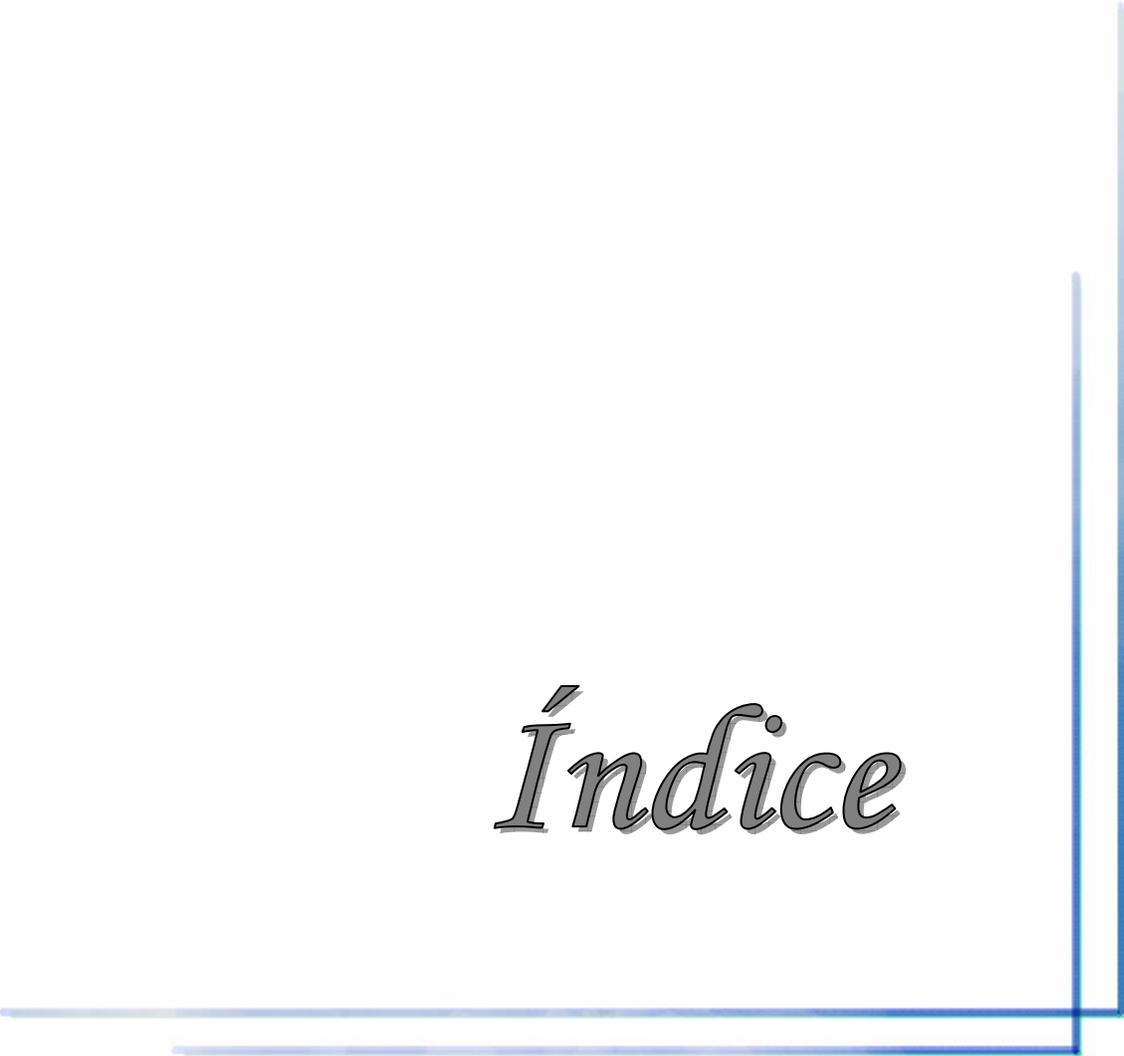
## *Resumen*

---

---

Este trabajo está dedicado básicamente al cálculo del área de cobertura en redes inalámbricas de área local, partiendo de las características que las distinguen dentro del mundo de las telecomunicaciones móviles. Se han definido las propiedades del enlace a las frecuencias de trabajo de esta modalidad de red, describiéndose las pérdidas por propagación en entornos típicos. Para la predicción de cobertura radioeléctrica se proponen diversos modelos de propagación frecuentemente empleados, brindándose además una detallada descripción de sus parámetros. Se ha puesto en consideración una guía de pasos lógicos a tener en cuenta antes, durante y posterior al diseño de una red inalámbrica, haciendo énfasis en el análisis de cobertura.

# *Índice*



<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1 REDES INALÁMBRICAS DE ÁREA LOCAL .....</b>	<b>3</b>
<b>1.1 REDES LAN INALÁMBRICAS .....</b>	<b>3</b>
1.1.1 COMPONENTES Y CONCEPTOS.....	4
1.1.2 TOPOLOGÍAS.....	6
<i>Topología ad hoc</i> .....	7
<b>1.2 ESTÁNDARES INALÁMBRICOS.....</b>	<b>8</b>
1.2.1 ESTÁNDAR IEEE 802.11.....	8
<i>Arquitectura externa</i> .....	8
<i>Estándares inalámbricos IEEE 802.11</i> .....	9
<i>Extensiones de los Estándares Inalámbricos</i> .....	13
<i>Seguridad en redes IEEE 802.11</i> .....	15
1.2.2 ESTÁNDAR HIPERLAN.....	16
<i>Tipología HiperLAN</i> .....	17
<b>1.3 OTROS ESTÁNDARES INALÁMBRICOS .....</b>	<b>19</b>
1.3.1 BLUETOOTH.....	19
1.3.2 HOMERF .....	20
<b>1.4 TECNOLOGÍAS DE RADIO .....</b>	<b>21</b>
1.4.1 ESPECTRO EXTENDIDO POR SALTO DE FRECUENCIA (FHSS).....	22
1.4.2 ESPECTRO EXTENDIDO POR SECUENCIA DIRECTA (DSSS).....	23
1.4.3 FHSS VS. DSSS .....	24
1.4.4 MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE FRECUENCIAS ORTOGONALES (OFDM).....	24
<b>1.5 BANDAS DE FRECUENCIA PARA REDES WLAN.....</b>	<b>25</b>
1.5.1 DIFERENCIAS EN LA BANDA DE 2.4 GHZ .....	26
1.5.2 BANDAS DE FRECUENCIAS DISPONIBLES EN LOS 5 GHZ.....	27
<b>CAPÍTULO 2 RADIOPROPAGACIÓN EN REDES INALÁMBRICAS .....</b>	<b>28</b>
<b>2.1 RADIOPROPAGACIÓN .....</b>	<b>28</b>
2.1.1 TÉRMINOS Y DEFINICIONES.....	28
<i>Espectro</i> .....	28
<i>Clasificación de los entornos</i> .....	29
<i>Línea visual</i> .....	31
<i>Zonas de Fresnel</i> .....	31
2.1.2 MECANISMOS DE PROPAGACIÓN.....	32
<i>Reflexión, refracción y absorción</i> .....	33
<i>Difracción</i> .....	34
<i>Dispersión</i> .....	34
2.1.3 DISTORSIÓN, INTERFERENCIA Y RUIDO .....	35

---

<i>Distorsión</i> .....	36
<i>Interferencia</i> .....	38
<i>Ruido</i> .....	38
2.1.4 FUNDAMENTOS DE FRIIS PARA EL ENLACE .....	40
<i>Pérdidas básicas de propagación en espacio libre</i> .....	40
<i>Pérdidas por propagación en entornos reales</i> .....	42
<b>2.2 MODELOS DE PROPAGACIÓN</b> .....	<b>42</b>
2.2.1 ENLACE PUNTO-A-PUNTO .....	44
2.2.2 MODELOS DE PROPAGACIÓN EN INTERIORES .....	45
<i>Modelos empíricos de banda estrecha</i> .....	46
<i>Modelos semi-deterministas</i> .....	53
2.2.3 MODELOS DE PROPAGACIÓN PARA EXTERIORES .....	56
<i>Modelos bidimensionales para entornos urbanos</i> .....	57
<b>CAPITULO 3 ANÁLISIS DE COBERTURA EN REDES WLAN</b> .....	<b>63</b>
<b>3.1 COBERTURA TEÓRICA</b> .....	<b>63</b>
<b>3.2 PROYECTO DE DISEÑO</b> .....	<b>65</b>
3.2.1 PARÁMETROS GLOBALES .....	65
3.2.2 PLANEAMIENTO DE CAPACIDAD Y COBERTURA .....	70
3.2.3 POSICIÓN DE LOS AP Y SELECCIÓN DE POTENCIA .....	72
3.2.4 ASIGNACIÓN DE CANAL .....	73
<b>3.3 MODELO DE COBERTURA</b> .....	<b>73</b>
<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>77</b>
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>78</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>79</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>82</b>
<b>ABREVIATURAS</b> .....	<b>88</b>

# *Introducción*



## **INTRODUCCIÓN**

En la actualidad, las tecnologías móviles experimentan un acelerado desarrollo en múltiples esferas económico-sociales. Dentro del enorme horizonte de las telecomunicaciones y la computación móvil, las redes inalámbricas van ganando adeptos, y manifestándose como una tecnología madura y robusta. La movilidad es, precisamente, una de las características fundamentales que le son atribuidas a este tipo de redes, dado que le brindan la posibilidad al usuario de trasladarse dentro de un entorno determinado. La disponibilidad y bajo precio de las comunicaciones inalámbrica la hacen una solución idónea incluso para naciones con una infraestructura de comunicaciones limitada. Esta tecnología presenta una formidable oportunidad tanto a nivel doméstico como a nivel de empresa.

Las universidades fueron las vanguardias en el estudio y desarrollo de esta modalidad de red dado fundamentalmente por las características de movilidad que las distinguen. Ya en la Universidad, específicamente dentro de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, se han venido realizando disímiles investigaciones a cerca de las redes LAN inalámbricas, muchas de estas encaminadas a las Telemáticas. Sin embargo, las tecnologías están sujetas a un acelerado cambio, lo que motiva a una sistemática investigación y actualización de los conocimientos existentes y se hace necesario encaminar el estudio desde otras aristas, principalmente vinculado con la asignatura Sistemas de Radiocomunicaciones.

Partiendo de estos puntos, se ha propuesto guiar las investigaciones a las características de los enlaces de radio, proporcionando un detallado informe a cerca de las propiedades de estas conexiones, así como un procedimiento analítico para el análisis de la cobertura de estas redes a fin de complementar el estudio que se viene efectuando desde años anteriores, aportando elementos nuevos de la Telemática inalámbrica actual, y a su vez, caracterizando a esta tecnología como sistema de radio.

Con estas intenciones han sido trazados los siguientes objetivos:

1. Definir los diferentes elementos de las redes inalámbricas.
  - Conceptualización.
  - Clasificaciones y características.

- Componentes y dispositivos que la conforman.
2. Enunciar las características principales de la propagación a las frecuencias de trabajo de las redes inalámbricas.
    - Normas.
    - Espectro de frecuencia explotado por estas redes.
    - Tecnologías y técnicas de modulación que emplean.
  3. Proponer un procedimiento para el cálculo de radio enlaces.

Estos objetivos se desarrollan a partir de las siguientes tareas técnicas:

1. Analizar la bibliografía referente al tema.
2. Describir los elementos de la red y sus principios de operación.
3. Determinar las características principales de la propagación de la onda radioeléctrica a estas frecuencias, teniendo en cuenta los elementos que degradan el enlace.
4. Análisis de las características distintivas de algunas de las firmas en el mercado y enunciar sus diferencias.
5. Proponer la metodología para el cálculo de un radio enlace.

Con el fin de lograr una correcta orientación a cerca del tema en cuestión, se ha dispuesto una estructuración básica con tres capítulos.

El primero aborda de manera general, todos los conceptos a fines y como ha sido el devenir de esta especificación tecnológica en el mundo.

En el segundo capítulo se brinda un acercamiento al tema proporcionando, inicialmente, los conceptos básicos relacionados con el fenómeno de propagación, centrados a las frecuencias de trabajo de las redes inalámbricas. Seguidamente se aborda sobre los diferentes métodos de predicción para el cálculo de la atenuación que sufre la señal en los entornos definidos.

Ya en el último se hace un análisis del cálculo de cobertura para este tipo de redes mostrando además las diferentes consideraciones a tener en cuenta para lograr una correcta predicción de cobertura en la zona de estudio.

# Capítulo 1



## Capítulo 1

### Redes Inalámbricas de Área Local

Las comunicaciones de radio, desde sus inicios, ya prometían una elevada posibilidad de explotación, y es recientemente que se ha logrado desarrollar y desplegar los servicios inalámbricos de datos a gran escala.

Las *Redes de Área Local Inalámbricas (WLAN, Wireless Local Area Network)*, también conocidas como Redes LAN de Radio, constituyen un sistema de comunicación de acceso por radio, carente de una infraestructura cableada, que permite a los equipos informáticos comunicarse entre sí, independientemente de su emplazamiento. Una red WLAN puede ser considerada como una “Ethernet inalámbrica” dado que es generalmente utilizada como una extensión de redes LAN cableadas.

#### 1.1 Redes LAN inalámbricas

Una red WLAN es una alternativa significativa que se impone, actualmente, en el adelanto tecnológico mundial. La creciente demanda de estas tecnologías, ha conllevado a un gradual desarrollo y perfeccionamiento de la misma, incorporando nuevas ventajas a las ya tradicionales asociadas a las redes cableadas.

La disponibilidad de conexiones inalámbricas, amplía la *movilidad* de los usuarios de la red, resolviendo problemas asociados a las redes cableadas, así como, en algunos casos, la *reducción de costos* de implementación. Sin embargo, a pesar de esta libertad, se incorporan nuevos retos, sobretodo en la seguridad del servicio y la configuración.

La *facilidad de instalación* de una red WLAN, es otra de sus ventajas distintivas, pues no se requiere de una conexión cableada, lográndose además, una mayor *flexibilidad*, pues ahora podemos llegar a zonas de difícil acceso por cable y una reestructuración más sencilla al carecer de él.

Actualmente, existen varias soluciones, con distintos niveles de estandarización e interoperabilidad. El amplio interés del sector para que exista *compatibilidad* entre los sistemas operativos, ha permitido resolver algunas de las cuestiones relacionadas con la implementación de las redes WLAN. De esta forma, se ha logrado además, una *integración* de tecnologías, dada la coexistencia ente las dos modalidades LAN.

Son estas algunas de las principales ventajas que fundamentan la necesidad de profundizar en el estudio de esta modalidad de red, sujeta a constantes transformaciones e introducciones de nuevos conceptos, para lograr un compromiso entre soluciones y demanda.

### 1.1.1 Componentes y conceptos

Con la aparición de nuevas tecnologías, se introducen nuevos conceptos y términos que las definen y distinguen de sus semejantes. En el ya extenso mundo de las redes móviles, se incorporan definiciones con las que es necesario familiarizarse para lograr una adecuada comprensión de la información, disponible en todo tipo de bibliografía.

La estación inalámbrica es, típicamente, una *laptop* o computadora personal equipada con una *Tarjeta de Interfaz de Red (NIC, Network Interface Card)* inalámbrica, la cual consta de una antena para el intercambio de información (Fig. 1.1a).

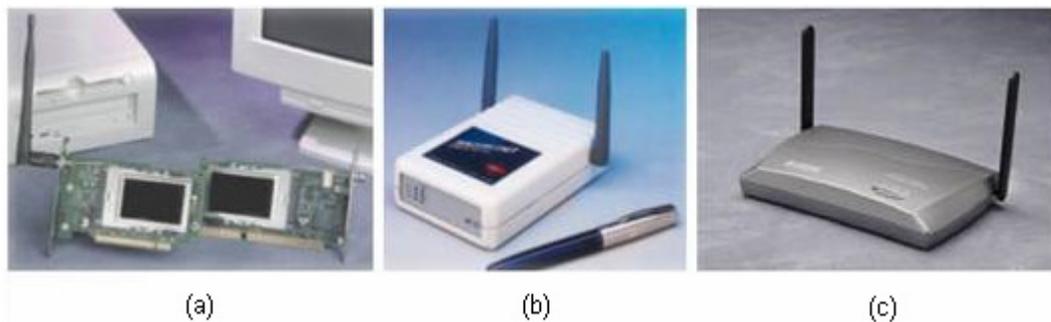


Figura 1.1 Componentes de una red inalámbrica, (a) Tarjeta de red para una interfaz inalámbrica, (b) Adaptador Externo y (c) Punto de Acceso.

Una alternativa al NIC inalámbrico, es el uso de un *Adaptador Externo*, dispositivo que forma parte de la infraestructura, encargado de adaptar la interfaz cableada con la inalámbrica, actuando como un receptor-transmisor externo de la computadora (Fig.1.1b). El *Punto de Acceso (AP, Access Point)* es el dispositivo encargado de la conexión inalámbrica entre una o más estaciones con la red LAN correspondiente, un equivalente aproximado a lo que pudiéramos llamar “*switch* inalámbrico” (Fig. 1.1c). Los puntos de acceso tienen un área de cobertura limitada en dependencia de su ubicación, ya sea en lugares cerrados o abiertos, o en entornos de interiores (*indoor*) o exteriores (*outdoor*). En una infraestructura extensa, para el caso de zonas amplias (universidades, hospitales, un edificio, etc.), se requiere del empleo de más de un AP para así cubrir toda el área y sus

usuarios puedan desplazarse de un lugar a otro sin perder la conexión. A esta movilidad, permisible a los clientes, es lo que se conoce como “*roaming*”.

En una red inalámbrica, es muy frecuente el uso de un punto de extensión, conocido como *Puente de Grupo de Trabajo (WB, Workgroup Bridge)*, dispositivo que garantiza la conexión inalámbrica de una red LAN cableada remota con un AP.

Para la conexión de redes LAN distantes, se emplean los puentes inalámbricos, equivalentes a un AP con una antena direccional, lográndose un enlace inalámbrico seguro, que conecta a estas redes de forma directa.

Actualmente existe en el mercado una gran variedad de dispositivos dedicados a facilitar las conexiones inalámbricas. Tal es el caso de los módulos con conexión USB, alternativas NIC para los ordenadores.

Otra definición a fin a las redes inalámbricas, aunque más relacionado al entorno comercial, es lo que se conoce como *hot-spot*<sup>1</sup>. Este modelo se basa en la prestación de servicios, fundamentalmente el acceso a Internet, y para aplicaciones de mensajería, navegación Web o juegos en red. Es aplicable a zonas específicas donde se concentra un gran número de clientes, en lugares de tránsito o vía pública, normalmente en aeropuertos, estaciones de tren, centros comerciales, hoteles, metro, centros de convenciones, cafés o restaurantes. Los *hot-spot* se dirigieron, inicialmente, al uso por parte de viajeros de negocios, aunque cada vez más se está extendiendo su uso a la población en general y dando lugar a una nueva genealogía, las redes públicas WLAN (*PWLAN*).

Como se observará posteriormente, las normas que rigen a los dispositivos inalámbricos característicos de redes WLAN, explotan fundamentalmente las bandas de frecuencias correspondientes a los 2.4 y 5 GHz. El exhaustivo uso de esta zona del espectro electromagnético se debe a que no requiere de licencias para su explotación, libre de restricciones según la regulación de los sistemas de radio, en un gran número de países. Estas bandas son destinadas a las aplicaciones industriales, científicas y médicas, nombradas ISM (*Industrial Scientific Medical*), a la que corresponden los rangos 902–928 MHz (banda 915 MHz), 2.4–2.4835 GHz (banda 2.4 GHz), y 5.725–5.85 GHz (banda 5.8 GHz). La primera de ellas no es explotada por las redes WLAN y al resto se adicionan los rangos de 4.9–5.0 GHz (en Japón), 5.15–5.35 GHz y 5.47–5.875 GHz.

---

<sup>1</sup> *Hot-spot*, referido a “lugares calientes”.

### 1.1.2 Topologías

La complejidad estructural de una red WLAN estará directamente relacionada con los servicios que se brindarán, la extensión perimetral a cubrir y sus características, los tipos de clientes que explotarán los recursos, el presupuesto disponible, entre otros factores. Dada esta variedad, las redes inalámbricas proponen diferentes topologías que dan soluciones a problemáticas comunes.

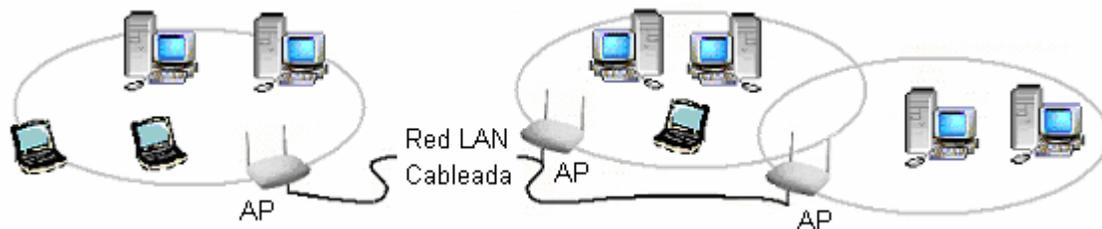


Figura 1.2 Configuración típica de una red WLAN, con el uso de (a) un AP y (b) dos AP.

Normalmente, a las redes LAN cableadas, se les anexan uno o más extremos inalámbricos para objetivos específicos, en diferentes áreas con características especiales (Fig. 1.2). Cuando una de estas áreas posee determinadas limitantes y no es suficiente el uso de un AP, entonces se incorporan otros de forma estratégica para lograr una mejor cobertura (Fig. 1.2b).

Otra posible opción para situaciones particulares de topología, es el uso de un WB, similar a un punto de acceso. Este está diseñado para enlazar un AP con una red LAN cableada remota y así extender el rango de cobertura de la red (Fig. 1.3).

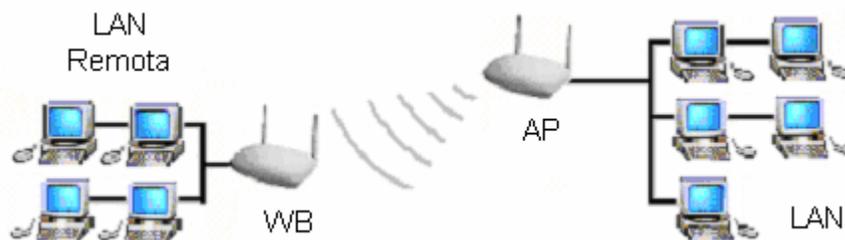


Figura 1.3 Aplicación de un WB-10

Es muy común el uso de puentes inalámbricos cuando se requiere vencer distancias considerables entre dos zonas que conforman una misma red. Esta topología (punto-a-

punto) es muy empleada para establecer un radioenlace entre edificios, con lo que se garantiza la conexión directa de la red LAN cableada, con su homóloga remota.

### **Topología ad hoc**

Las redes “ad hoc” son consideradas estructuras de interconexión entre dos o más dispositivos inalámbricos con características especiales. Son redes inalámbricas independientes pues intercambian información en ausencia de un punto de acceso. Tienen un tiempo de existencia limitado dada la movilidad de sus miembros constituyentes.

Estas redes de radio ofrecen ventajas en el intercambio de datos homólogo-a-homólogo (*peer-to-peer*) entre los nodos que la conforman. Uno de sus beneficios está estrechamente relacionado con su característica fundamental, cada nodo tiene la capacidad de encaminar las tramas de información hacia sus vecinos.

Dado que las topologías ad hoc están propensas a cambios estructurales constantes, las conexiones son alcanzadas examinando continuamente el estado de la red (encaminamiento proactivo), chequeando su estado actual en caso de existir tráfico para ser transmitido (encaminamiento reactivo), o una combinación de estos dos métodos.

El encaminamiento proactivo requiere de un uso exhaustivo del ancho de banda, característica que lo diferencia del modo reactivo. La selección del método más idóneo (entre dos extremos) depende mucho de la aplicación, la configuración y el contexto del servicio [Kumar *et. al.*, 2001].

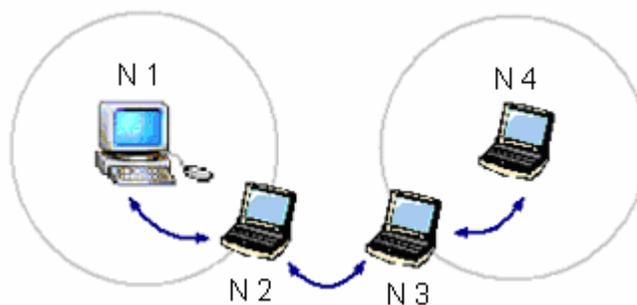


Figura 1.4 Enrutamiento en una red ad hoc sencilla.

Observando la figura 1.4, ha de notarse como es improbable que el nodo 1 pueda establecer una comunicación directa con los nodos 3 y 4. Para realizar un intercambio de

tráfico entre ellos, deben utilizar al nodo 2 (y 3 en caso de establecer una comunicación con el nodo 4) como mediador, ya que éste si entra dentro de su radio de acción.

## 1.2 Estándares inalámbricos

La industria de las redes WLAN, han manifestado un acelerado crecimiento en el campo de las telecomunicaciones. Esto ha llevado a que prestigiosas organizaciones como la IEEE y la ETSI, desarrollen un amplio estudio de la tecnología de radio, dando lugar a las normas por las que se rigen importantes firmas para el diseño de dispositivos inalámbricos (NIC, AP, WB, etc.).

La familia de estándares IEEE 802.11 e HiperLAN, desarrolladas en América y Europa respectivamente, son unas de las que gozan de mayor aceptación.

### 1.2.1 Estándar IEEE 802.11

Desde que el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) establece, en 1990, el comité de estandarización IEEE 802.11, se inicia un complejo trabajo de definición de conceptos, arquitectura, servicios y estándares de las redes LAN inalámbricas, las que comenzaban a reclamar terreno en el desarrollo tecnológico mundial.

#### Arquitectura externa

El grupo de trabajo 802.11 ha desarrollado un modelo de arquitectura externa definido por dos conceptos fundamentales: *Grupo de Servicio Básico (BSS)* y *Grupo de Servicio Extendido (ESS)* [Stalling, 2000].



Figura 1.5 Grupos de Servicio Básico, (a) Independiente, (b) a través de un punto de acceso.

El *Grupo de Servicio Básico* consiste en un número determinado de estaciones que compiten por acceder al mismo medio compartido, ya sea de forma independiente (Fig.1.5a) o a un punto de acceso conectado a un sistema de distribución determinado según el modelo cliente/servidor (Fig. 1.5b).

El grupo de servicio básico independiente (IBSS) no requiere de un AP, en cuyo caso, se está en presencia de una red LAN inalámbrica ad hoc.

El *Grupo de Servicio Extendido* es la clasificación de dos o más grupos de servicio básico interconectados por un sistema de distribución determinado (Fig. 1.6).



Figura 1.6 Grupo de Servicio Extendido formado por dos grupos de servicio básico.

## **Estándares inalámbricos IEEE 802.11**

Según se define en el nivel de Control de Acceso al Medio (MAC, *Medium Access Control*), 802.11 utiliza la técnica CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) para transmitir sus paquetes, con la que las estaciones comparten, de forma general, el mismo radio canal y compiten por el acceso.

### **IEEE 802.11**

Fue publicada el 1997, considerándose la primera norma de la familia IEEE 802.11, con operatividad dentro de la banda de los 2.4 GHz. Se lograron velocidades hasta 2 Mbps con una tasa de datos de 1.2 Mbps. Define dos niveles físicos, espectro extendido por salto de frecuencia (FHSS, *Frequency Hopping Spread Spectrum*) y de secuencia directa (DSSS, *Direct Sequence Spread Spectrum*). Para la aplicación FHSS, se emplea

modulación 2GFSK y 4GFSK (*Gaussian Frequency Shift Keying*) para lograr 1 y 2 Mbps respectivamente, y se explotan 79 canales desde 2.402 hasta 2.480 GHz en Estados Unidos y muchos países de la Unión Europea (UE). En cambio, para DSSS, emplea dos tipos de modulación, DBPSK (*Differential Binary Phase Keying*) y DQPSK (*Differential Quadrature Phase Keying*) para 1 y 2 Mbps respectivamente, definiendo 14 canales solapados, con 22 MHz de ancho de banda cada uno, desde los 2.401 a 2.483 GHz.

### **IEEE 802.11b**

Se establece en 1999 como una evolución del estándar IEEE 802.11, operando en la misma banda, dentro de los 2.4 GHz. Este sólo emplea DSSS alcanzando velocidades de 1, 2, 5.5 y 11 Mbps, similar a las conexiones de 10 Mbps de las Ethernet basadas en los grupos de trabajo, con modulación CCK (*Complementary Code Keying*) y DQPSK, ahora con un mejor desempeño con respecto a su antecesor, aunque aún con una razón de datos pequeña que cae, aproximadamente, a la mitad de su velocidad total.

La capacidad de la red no es uniforme y depende del entorno, las distancias y el número de usuarios conectados simultáneamente así como de las aplicaciones que se brinden y soliciten. En la práctica, ese ancho de banda compartido y a esa razón de datos son suficientes para la mayor parte de las aplicaciones, excepto para flujos de video. Partiendo del elevado número de usuarios que hacen uso del servicio y que el ancho de banda es compartido entre estos, es posible instalar otros puntos de accesos en un mismo local con el objetivo de mejorar las prestaciones, aumentando el ancho de banda disponible. Haciendo uso de la norma IEEE 802.11b, la carga puede ser equilibrada con tres puntos de accesos instalados en el área, para un total de 33 Mbps como máximo y con mayor desempeño.

Si se realiza un análisis del ancho de banda, las redes WLAN, regidas por la norma IEEE 802.11b, requieren de 22 MHz mínimo, brindando la posibilidad de operación de tres redes WLAN paralelas, dentro de la banda ISM con alrededor de 80 MHz (2.4–2.4835 GHz).

Este estándar es uno de los más difundidos dentro de las normas inalámbricas dado que también explota las bandas ISM. Independientemente que aún su velocidad es menor que las alcanzadas por redes cableadas, sus capacidades en la prestación de servicios, cubre las necesidades de muchas organizaciones que solicitan esta tecnología, dadas sus ventajas sobre las cableadas en cuanto a movilidad.

Existe compatibilidad entre los productos IEEE 802.11b de diferentes proveedores, certificadas por la Alianza de Compatibilidad en Ethernet Inalámbrica (WECA, *Wireless Ethernet Compatibility Alliance* también llamada *Wi-Fi Alliance*), asociación internacional no lucrativa creada con el objetivo de certificar la interoperatividad de las redes LAN inalámbricas. Este consorcio, formado por un nutrido grupo de relevantes empresas, ha establecido el estándar Wi-Fi para la certificación de aquellos productos acogidos a estas normativas, obligándolos a una compatibilidad que va desde la facilidad de configuración hasta el modo de funcionamiento, entre otros aspectos comunes.

### **IEEE 802.11a**

Este estándar fue ratificado en el año 1999, pero no es hasta diciembre del 2001 que se introduce en el mercado internacional. Las frecuencias de trabajo se ubican en los 5 GHz, usando técnicas de multiplexación por división de frecuencia sobre portadoras ortogonales (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) empleando hasta 8 canales no solapados, equivalente a 8 puntos de acceso, ahora con una velocidad hasta los 54 Mbps según se puede observar en la tabla 1.1 y con sus respectivos tipos de modulación.

Tabla 1.1 Razones de datos para la 802.11a y los tipos de modulación correspondientes.

<b>Velocidad (Mbps)</b>	<b>Tipo de Modulación</b>
6	BPSK
9	BPSK
12	DPSK
18	DPSK
24	16QAM
36	16QAM
48	54QAM
54	54QAM

Comparando la norma IEEE 802.11a con las 11 y 11b, ha de notarse que brindan un mayor número de facilidades ya que soporta un elevado porcentaje de usuarios con una mayor razón de datos y menor probabilidad de interferencia con otras tecnologías dentro de su banda de trabajo.

Lamentablemente no existe compatibilidad, tanto inversa como directa, entre los productos (NIC y AP) regidos por las normas IEEE 802.11a y sus predecesores, dado

que trabajan a diferentes frecuencias. No obstante, en la actualidad, los proveedores de dispositivos de redes inalámbricas, confeccionan equipos capaces de operar en las normas 11a y 11b de forma simultánea (Fig. 1.7).

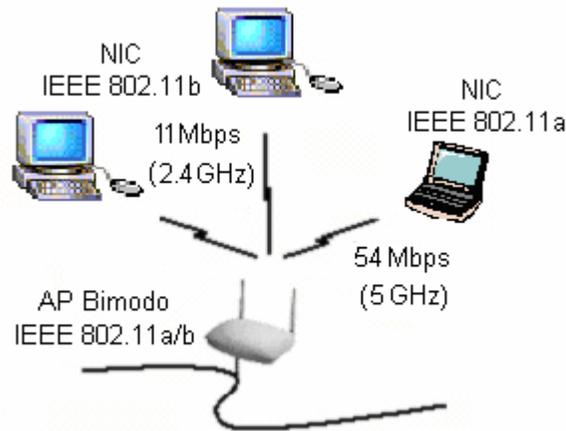


Figura 1.7 Desempeño de un Punto de Acceso bimodo.

En abril del 2002, la *Cisco System Inc.* desarrolló la serie comercial *Cisco Aironet 1200 Series Access Point*, productos que acomodan ambas bandas del espectro radioeléctrico (2.4 y 5 GHz) dando como resultado 11 canales sin solapamiento, 8 desde la banda de los 5 GHz y otros 3 desde la de 2.4 GHz.

La Wi-Fi5 (Wi-Fi para la tecnología aplicable a la banda de 5 GHz) procede de la Wi-Fi original en la IEEE 802.11b. Esta organización se encarga de garantizar la interoperatividad entre equipos con igual fin, que exploten esta banda del espectro.

### **IEEE 802.11g**

Este estándar fue aprobado en el 2001 y ya en octubre del siguiente año se da a conocer un preproyecto con disponibilidad de 54 Mbps de velocidad, dentro de la banda de los 2.4 GHz. Posibilita la interoperatividad con la norma IEEE 802.11b, limitándose a los 3 canales sin solapamiento con igual ancho de banda. Para lograr los 54 Mbps se usa la técnica OFDM similar a la norma IEEE 802.11a.

Existe compatibilidad ascendente con la tecnología DSSS, en cuyo caso, la velocidad se limita a los 11 Mbps. Esta interoperatividad implica que un cliente con un NIC normado según la IEEE 802.11b, puede desempeñarse dentro de un área de cobertura monitoreada por un AP IEEE 802.11g, y viceversa. Sólo se logran los 54 Mbps, cuando

este intercambio de información, se establece entre dos productos normados dentro de este último estándar (Fig. 1.8).

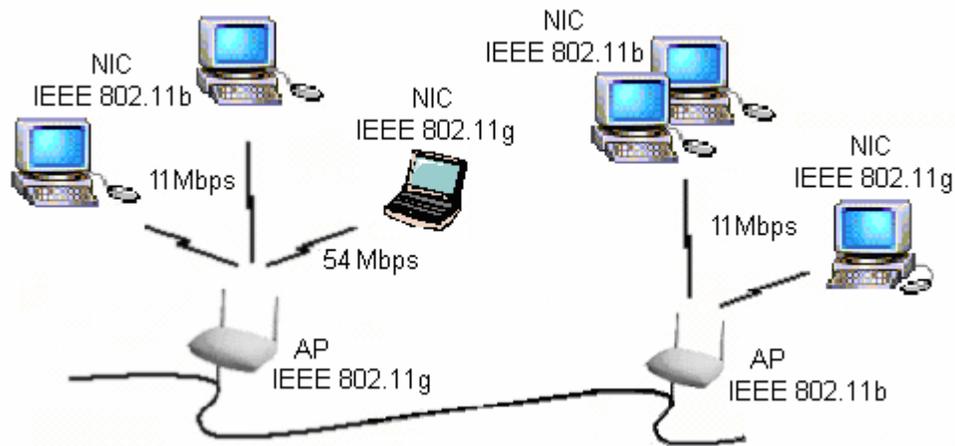


Figura 1.8 Interoperatividad entre los estándares IEEE 802.11b y 11g.

En noviembre del 2003, *3Com Corporation* introdujo al mercado una gama de soluciones inalámbricas con nuevos puntos de acceso y dispositivos (tarjetas y adaptadores) en tres modalidades para las redes LAN inalámbricas, logrando así, la combinación de seguridad avanzada con productos integrados que soportan los tres estándares Wi-Fi IEEE 802.11a, 11b y 11g.

### **Extensiones de los Estándares Inalámbricos**

En adición a las normas anteriores y paralelamente con sus progresivas introducciones al mercado mundial, se fueron desarrollando otro conjunto de estándares destinados al perfeccionamiento de los servicios brindados por las redes de radio.

#### **IEEE 802.11h**

Esta norma responde a las exigencias europeas específicamente. Prevé el *Control de la Potencia de Transmisión (TPC, Transmit Power Control)* y la *Selección Dinámica de Frecuencia (DFS, Dynamic Frequency Selection)*, para los equipos que operan en la banda de los 5 GHz.

TPC es una técnica que consiste en transmitir en un nivel de potencia mínima requerida para mantener el enlace cuando se ha establecido una conexión inalámbrica. Tiene la

ventaja de conservar la energía de la batería del equipo móvil aumentando así el tiempo operacional entre recargas. TPC también desempeña un papel importante en la limitación de los niveles acumulativos de radiación en la banda de los 5 GHz, disminuyendo el riesgo de interferencia a los sistemas satelitales y de radar.

DFS permite el monitoreo y la supervisión constante del canal de radio para la presencia de otros usuarios y con ella se logra la selección aleatoria de un canal libre y el respectivo traslado a él. Con una selección dinámica de frecuencia, se logra extender el uso a través de todos los canales disponibles, maximizando el número de usuarios que coexisten durante un mismo instante de tiempo y protegiendo otros servicios propensos a interferencia contra la señal OFDM, principalmente los sistemas de radar.

#### ***IEEE 802.11d***

Constituye un complemento al nivel MAC en la familia IEEE 802.11, proporcionando el uso, a escala mundial, de las redes WLAN de este estándar. Asegura que los puntos de acceso comuniquen la información sobre los canales de radio admisibles, con niveles de potencia aceptables para los dispositivos de los usuarios.

#### ***IEEE 802.11e***

Garantiza la adición del soporte QoS (calidad de servicio) al protocolo MAC. Posibilita la incorporación de aplicaciones de requerimientos especiales de tiempo como voz y video, así como videoconferencias sobre redes de radio normadas por la familia IEEE 802.11.

#### ***IEEE 802.11i***

Incorpora la seguridad mediante la encriptación avanzada y procedimientos de autenticación, según los requerimientos de alta privacidad que sean solicitados. Es el equivalente a WPA2, última versión en seguridad de redes inalámbricas.

#### ***IEEE 802.11f***

Especifica un protocolo entre puntos de acceso (IAPP, *Inter-Access Point Protocol*) para la comunicación entre estos, independientemente de los proveedores y la marca de los productos.

Comprende la inscripción de un punto de acceso en una red y el cambio de información cuando un usuario se traslada en la zona de cobertura gestionada por los puntos de acceso de diferentes orígenes.

### **IEEE 802.11j**

Está destinada a la interoperatividad entre las normas 802.11a y la europea HiperLAN. Minimiza las diferencias entre ambos estándares para así lograr compatibilidad entre los productos de diferentes proveedores.

## **Seguridad en redes IEEE 802.11**

Previo a decidir que medida de seguridad se implementará, es de vital importancia realizar un estudio de radiopropagación para los AP a instalar en la red WLAN. Se requiere restringir la cobertura a la zona de interés, ya que con una correcta combinación antena-transmisor podemos evitar extender el área de acceso a lugares ajenos a nuestros propósitos.

El estándar IEEE 802.11 sujeta otras disímiles características de seguridad, tales como *autenticación en sistema abierto* y de *clave pública*, el *Identificador de Grupo de Servicios (SSID, Service Set Identifier)*, y el *Equivalente a Privacidad Cableada (WEP, Wired Equivalent Privacy)*. Estos aspectos se diferencian en el grado de confiabilidad. Cada uno de ellos han sido objetos de estudios en la seguridad de redes, y muestran cierto nivel de vulnerabilidad ante los ataques de intrusos [Harris, 2001].

La vulnerabilidad del protocolo WEP ha sido estudiada y demostrada teóricamente por un grupo de estudio en la seguridad de redes inalámbricas, de la Universidad de Berkeley, California, los que han publicado una serie de artículos conocidos como "*Berkeley Paper*", que exponen a detalle las fragilidades del algoritmo criptográfico RC4 y de la forma en la que es usado en el estándar 802.11 [Borisov, *et. al.* 2001].

Con el fin de mejorar las debilidades de las técnicas empleadas, la IEEE define el estándar 802.1x, el cual promueve una fuerte y más flexible seguridad que la autenticación y los mecanismos de encriptación [Huckaby, 2001].

Consecuentemente, el estándar 802.1x ha sido objetivo de estudio y víctima de ataques que han manifestado sus debilidades. En su lugar, surgen otros nuevos como el *Acceso Protegido Wi-Fi (WPA, Wi-Fi Protected Access)* y una versión mejorada del mismo, conocida como IEEE 802.11i o WPA2 [Erlanger, 2003].

### **Limitación de la Propagación de RF**

La direccionalidad y ganancia de una antena constituyen dos características fundamentales a la hora de determinar el área de cobertura requerida. Una antena omnidireccional radia a 360°, en tanto las direccionales limitan la cobertura a zonas con mayor definición (Fig. 1.5).

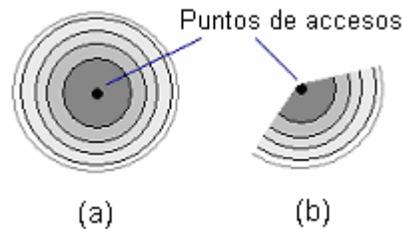


Figura 1.1 Patrones de radiación, (a) Omnidireccional, (b) Direccional.

Teniendo en cuenta que las normas inalámbricas explotan las bandas media y alta ISM, sin requerimiento de licencias, se hace de esto una ventaja que actúa a su vez de atractivo para otras tecnologías y perjudicial para las redes de radio, las que son víctimas de la interferencia con otros sistemas o dispositivos inalámbricos que también basan su funcionamiento en esta área específica del espectro.

Un atacante con recursos podría usar transmisores de alta potencia, antenas de alta ganancia, y/o receptores más sensibles, logrando alcanzar límites que no le son autorizados.

Cada aspecto anteriormente analizado, puede afectar el rango efectivo físico de una red inalámbrica. Luego de ser prevenido estos puntos de debilidad, es entonces que comienzan a jugar un papel fundamental las normas y software afines a la seguridad de redes.

### **1.2.2 Estándar HiperLAN**

El Instituto de Estándares de Telecomunicaciones Europeo (ETSI), constituye otra organización de estandarización para el reconocimiento de las normas enmarcadas en este continente. A finales de 1991, comenzó un estudio de la tecnología inalámbrica con el objetivo de crear un modo Ethernet de radio que permitiera una alta ejecución en redes inalámbricas carente de una infraestructura cableada. Para el desarrollo de este proyecto se asigna la banda de frecuencia de los 5 GHz.

Este trabajo fue completado en 1997 e HiperLAN (*High Performance Radio LAN*) se convierte formalmente en un estándar ETSI. En este mismo año se decide reorganizar y fusionar el trabajo del comité HiperLAN con otros grupos de estándares de accesos inalámbricos, por lo que, los venideros estudios para el desarrollo de esta norma, pasan a integrar el proyecto BRAN (*Broadband Radio Access Network*), encargado ahora de acondicionar los estándares a una velocidad de 24 Mbps y más, basándose en las redes cableadas en entornos privados y públicos.

Los estándares HiperLAN, de acuerdo a sus aplicaciones, proveen técnicas TCP y FDS, propiedades que la distinguen, en generalidad, con la familia inalámbrica 802.11, con excepción de la 11h, concebida para estas especificidades.

### ***Tipología HiperLAN***

El proyecto BRAN dedica sus estudios al desarrollo de estándares de alto desempeño en redes inalámbricas de área local, personal y metropolitana, según las normalizaciones HiperLAN, HiperPAN e HiperMAN<sup>2</sup> respectivamente.

A partir del perfeccionamiento de este proyecto, se categoriza el estándar HiperLAN en 4 prototipos fundamentales: HiperLAN de tipo 1 y 2, HiperACCESS (HiperLAN tipo 3) e HiperLINK (HiperLAN tipo 4), cada uno con sus características particulares que lo hacen agradable a determinadas aplicaciones.

#### ***HiperLAN tipo 1***

La especificación técnica para HiperLAN tipo 1 es ETS 300 652, publicada por ETSI en octubre de 1996, para las aplicaciones inalámbricas en la banda de frecuencia de los 5 GHz. Esta norma constituye la primera concebida desde los estudios iniciales, previa al surgimiento del proyecto BRAN. Proporciona una velocidad típica de 24 Mbps, con una tasa de datos aproximada de 20 Mbps, en redes de área local inalámbrica, compatible con las LAN cableadas y Token Ring, según las normas ISO 8802.3 e ISO 8802.5 respectivamente.

HiperLAN/1 posibilita instaurar redes WLAN de datos flexibles y soportar aplicaciones de multimedia, sin la necesidad de una estructura cableada.

---

<sup>2</sup> HiperPAN e HiperMAN corresponden a estándares inalámbricos para redes PAN y MAN.

### **HiperLAN tipo 2**

Similar a IEEE 802.11a, la norma HiperLAN/2 opera en la banda de los 5 GHz usando multiplexación por división de frecuencia sobre portadoras ortogonales (OFDM) y ofrece velocidades hasta 54 Mbps. El nivel físico de HiperLAN/2 es muy similar al definido por la IEEE en el estándar 802.11a.

Constituye una norma flexible, diseñada para redes TCP/IP, móviles 3G<sup>3</sup> y ATM de corto alcance, además de su empleo en redes privadas WLAN. Dentro de sus aplicaciones básicas se incluyen dato, voz y video, con especificaciones de parámetros QoS.

HIPERLAN/2 constituye una marca en el desarrollo de una tecnología combinada para WLAN, en la que se logran desempeños similares a las redes LAN cableadas, así como también para las comunicaciones celulares de corto alcance.

La similitud entre la 802.11a e HiperLAN/2, finaliza al analizar las características del nivel de control de acceso al medio (MAC). Mientras que la primera utiliza CSMA/CA para transmitir paquetes, HiperLAN/2 emplea TDMA (*Time Division Multiple Access*).

El uso del modo TDMA, comparándolo con el empleado por la norma IEEE 802.11a, ofrece una relación regular de tiempo para acceder a la red. Estos sistemas asocian dinámicamente a cada estación, una ranura de tiempo, basándose en los requerimientos de la estación para un correcto desempeño.

### **HiperACCESS**

Los primeros ejemplares con las especificaciones HiperACCESS se publican en el 2001. Es considerada como la tercera (tipo 3) dentro de la familia HiperLAN, aplicable en la banda de los 40.5–43,5 GHz, lográndose rezones de bit típicas de hasta 25 Mbps, adaptable a usuarios de empresas residenciales y pequeñas, así como a una amplia variedad de redes de mayor envergadura, entre las que encontramos redes principales UMTS, ATM y las basadas en el protocolo TCP/IP.

### **HiperLINK**

HIPERLINK, también conocido como HiperLAN tipo 4, proporciona una alta velocidad de transferencia, dentro de la banda de los 17 GHz, a 155 Mbps, soportando aplicaciones de multimedia.

---

<sup>3</sup> 3G, Redes Móviles de Tercera Generación.

Es empleado fundamentalmente para interconexiones estáticas y de redes HiperACCESS y/o puntos de acceso HiperLAN, para un entorno completamente inalámbrico.

### **1.3 Otros estándares inalámbricos**

Las redes WLAN, aunque son la base de la expansión y flexibilidad de muchas de las actuales redes LAN, pecan quizás de ser una solución más bien general y dirigida a entornos de trabajo en grupos y empresas. Precisamente, esta generalidad, ha conllevado a que nuevas tecnologías como Bluetooth y HomeRF, surjan en torno al estándar 802.11, optando por especializarse en ofrecer una conectividad inalámbrica, ahora enfocada a usos mucho más particulares y en relación directa con los futuros intereses de una sociedad a principios del siglo XXI.

#### **1.3.1 Bluetooth**

La tecnología inalámbrica Bluetooth fue originalmente desarrollada por *Ericsson Mobile Communications* en 1994. Es una especificación para la industria informática y de las telecomunicaciones que describe un método de conectividad móvil con el cual se pueden interconectar dispositivos como teléfonos móviles, Asistentes Personales Digitales (PDA, *Personal Digital Assistant*), ordenadores y otros inalámbricos portátiles, garantizando, esencialmente, la conexión a Internet. Es un estándar que describe el enlace entre múltiples dispositivos, de una forma sencilla y sincronizada, con bajo perfil tecnológico, bajo costo y bajo consumo de potencia, características típicas de las tecnologías de redes inalámbricas de área personal (WPAN, *Wireless Personal Area Network*) a las que Bluetooth pertenece.

El consorcio *Bluetooth SIG (Bluetooth Special Interest Group)*, el cual comprende compañías de elevado prestigio como *Ericsson, IBM, Toshiba, 3Com, Nokia, Motorola, Microsoft* e *Intel*, entre otras, creó la primera especificación en julio de 1999, empleando técnicas de modulación de espectro extendido FHSS y con explotación de la banda de los 2.4 GHz, motivo por el cual resulta importante incluirlo como objetivo de estudio, independientemente de ser una especificación WPAN.

Dado que Bluetooth opera en la banda media del espectro de frecuencia ISM, la cual es también compartida por el estándar IEEE 802.11b y otros propósitos especiales (hornos de microondas, juguetes infantiles, etc.), pueden existir posibles interferencias entre estas

múltiples tecnologías de radio, razón por la que, a la hora de conformar un diseño de una red inalámbrica, se requiere de un medido análisis relacionado con el uso del espectro radioeléctrico de la zona de interés y el área circundante y así evitar estas molestas contrariedades.

Las red ad hoc formada por dispositivos que emplean esta tecnología es llamadas “*piconet*”, la que se origina dinámicamente y se reconfigura según se requiera. Las redes piconet consisten en hasta ocho nodos, compartiendo un mismo canal. Existe siempre una unidad que actuará como “maestro”, encargándose de controlar el acceso al canal y el resto de las unidades como “esclavos”. Una unidad maestro puede ser esclavo en otra piconet, sin embargo no puede ser maestro en dos piconet diferentes.

La “*scatternet*” es una red formada por múltiples piconet. Esta se forma cuando una unidad es maestro y esclavo a la vez o es esclavo en dos piconet diferentes. Consecuentemente se extiende la cobertura y se puede tener un mayor número de dispositivos. Se recomienda no tener más de 4 piconet en la misma zona por problemas de interferencia entre ellas.

### **1.3.2 HomeRF**

Lanzado en marzo de 1998, el Grupo de Trabajo *Home Radio Frequency (HomeRF Working Group)* se ha dedicado al perfeccionamiento de redes inalámbricas para voz y dato en el hogar. *Compaq, Intel, Motorola, National Semiconductor, Proxim y Siemens*, son 6 compañías promotoras, dentro de un elevado número de entidades miembros de HomeRF WG.

Esta especificación está sujeta al Protocolo de Acceso Inalámbrico Compartido (SWAP, Shared Wireless Application Protocol), diseñado con la intención de lograr una interoperatividad ente una amplia gama dispositivos con fines domésticos. Los productos con especificaciones SWAP operan en la banda de frecuencia de los 2.4 GHz, con el empleo de la tecnología FHSS, haciendo más segura y robusta la conexión inalámbrica y soportando modalidades TDMA para servicios de voz y CSMA/CA para servicios de datos de alta velocidad.

Dado el uso de la banda media ISM, los dispositivos HomeRF están sujetos a interferencias con otros que también operan en los 2.4 GHz. Sin embargo, esta tecnología y Bluetooth, a pesar de compartir el mismo espectro de frecuencia, no interfieren al operar en el mismo espacio. Es importante destacar que Bluetooth es una

tecnología para conectar, a corto alcance, dispositivos móviles y brindar servicios de Internet. En cambio, HomeRF es una tecnología inalámbrica óptima para el ambiente familiar, dado que su uso primario es conformar una red de voz y dato entre una amplia gama de módulos domésticos.

## 1.4 Tecnologías de Radio

Las tecnologías de RF y la transmisión infrarroja pueden utilizarse para la implementación de las redes WLAN. La transmisión infrarroja usa ondas de luz de alta frecuencia para transmitir datos. Esta tecnología es rentable y barata para las comunicaciones sin hilos de corto alcance, pero no se ha aceptado extensamente debido a las limitaciones de cobertura y a su discapacidad para cubrir una trayectoria de difícil acceso. En cambio se han propuesto varias tecnologías alternativas, explotadas en la actualidad con una gran aceptación.

La tecnología de espectro extendido o disperso (SS, Spread Spectrum), considerada una técnica de radiofrecuencia de banda ancha, se ha convertido en un esquema de modulación muy difundido en la actualidad, postulada por la actriz de Hollywood Hedi Lamarr durante la Segunda Guerra Mundial y utilizada originalmente por los militares de occidente hasta la década del 70 para las comunicaciones secretas. En 1993 el Comité Federal de Comunicaciones (FCC, Federal Communications Commission), de los Estados Unidos, autoriza la operación sin licencia de sistemas SS con enlaces de radio y potencia de transmisión de hasta 1W en las bandas ISM.

En esta tecnología, se transmite una señal usando un código que la “extiende” a través de todo el ancho de banda disponible o la hace “saltar” de una frecuencia a otra en un patrón predeterminado (Fig. 1.10).

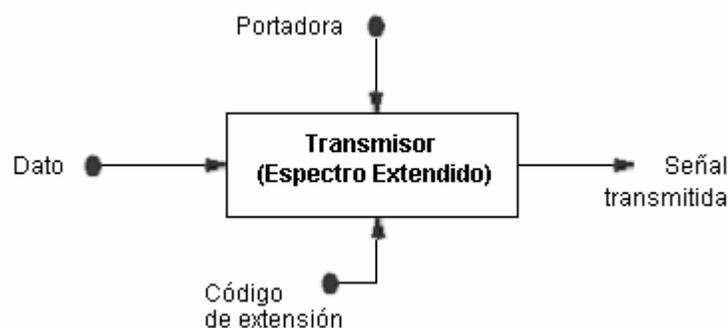


Figura 1.9 Esquema básico de un transmisor SS.

Luego, un receptor especialmente diseñado, descarta el código único previendo una intromisión ilícita. Consecuentemente, se hace difícil que la señal sea recuperada sin un previo conocimiento del código de extensión empleado. También tiene la ventaja de hacer el sistema muy tolerante a la interferencia procedente de otros tipos de sistemas de radio.

Este método se diseña con el fin de lograr confiabilidad y seguridad sacrificando un buen aprovechamiento del ancho de banda, si bien es cierto que esta tecnología lo explota más en comparación con la de banda estrecha, puede coexistir con otros sistemas inalámbricos sin interrupción. Con la dispersión de la energía de la señal sobre un gran ancho de banda, se logran, en resumen, propiedades particularmente ventajosas, tales como una considerable inmunidad a interferencias, mejor rechazo al ruido, disminución del efecto de propagación multitrayecto y un cierto aumento del grado de privacidad de las comunicaciones, entre las fundamentales. Sin embargo, es vulnerable a interferencias procedentes de otros sistemas SS ya que se pueden incorporar errores en los códigos transmitidos.

Existen, además, técnicas para transmitir cantidades grandes de datos digitales en onda de radio. Una del más importante para las redes WLAN es la de multiplexación por división de frecuencia sobre portadoras ortogonales (OFDM) que como se abordó con anterioridad, es la técnica implementada por las normas 802.11a e HiperLAN/2 entre las fundamentales.

### **1.4.1 Espectro extendido por salto de frecuencia (FHSS)**

La tecnología de espectro extendido por salto en frecuencia consiste en transmitir una parte de la información en una determinada frecuencia durante un período llamado *tiempo de detención*<sup>4</sup> (tiempo empleado en una frecuencia particular durante cualquier simple salto). Pasado este tiempo se cambia la frecuencia de emisión y se “salta” a otra frecuencia. Como resultado, cada trama se va transmitiendo en una frecuencia distinta durante un intervalo muy corto de tiempo.

La transmisión, para una frecuencia específica, se lleva a cabo utilizando una portadora de banda estrecha que va cambiando o saltando en el transcurso del tiempo, lo que equivale a realizar un fraccionamiento de la información en el dominio del tiempo (Fig.1.11).

---

<sup>4</sup> Tiempo de detención, referido al término inglés “*dwell time*”

La disposición de los saltos en frecuencia realizadas por el emisor esta determinada por una secuencia pseudo aleatoria definida en unas tablas compartidas por los extremos emisor y receptor.

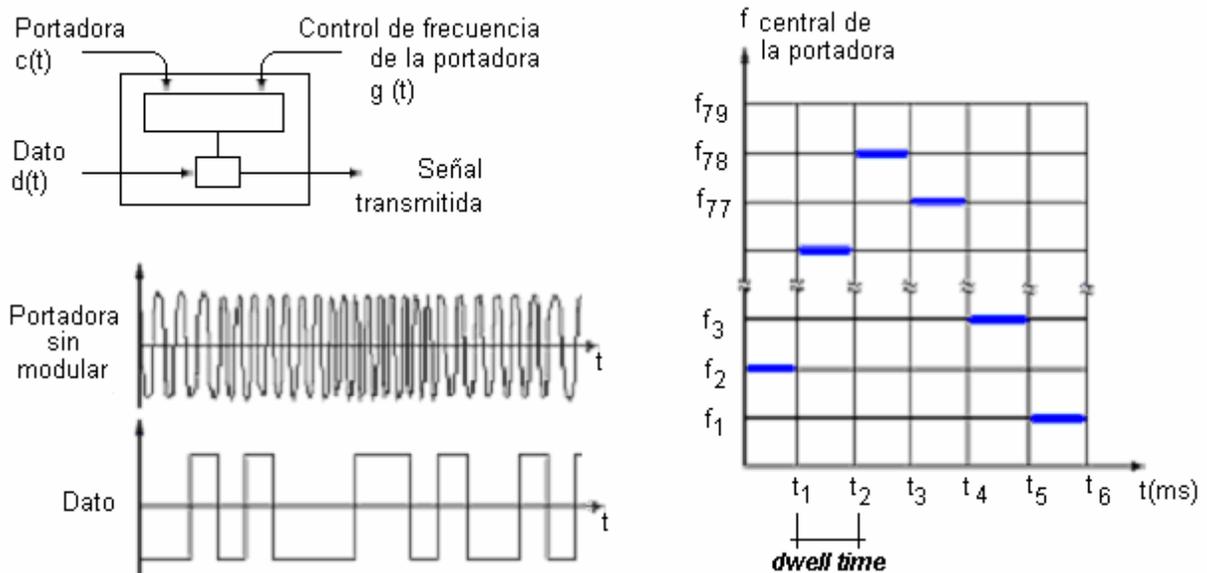


Figura 1.10 Técnica de modulación FHSS.

### 1.4.2 Espectro extendido por secuencia directa (DSSS)

La técnica de espectro extendido por secuencia directa radica en la generación de un patrón de bits redundante llamado código "chipping" o señal de "chip" para cada uno de los bits que conforman la señal de información y la posterior modulación de la señal resultante mediante una portadora de RF. En recepción es necesario realizar el proceso inverso para obtener la señal de información original.

Esta técnica aumenta el ancho de banda requerido para transmitir la información, modulando la secuencia de datos con un código de extensión. Con DSSS, se transmite el código *chipping* redundante (patrón de bits) con cada ráfaga de señal, sólo conocido entre el transmisor y el receptor. Si en el patrón se dañan uno o más bits durante la transmisión, los datos originales se pueden recuperar dada su redundancia. Básicamente, mientras más larga es la señal de chip, mayor es la probabilidad de recuperación de los datos originales. Para el estándar 802.11 la secuencia utilizada para modular cada uno de los bits de información es llamada secuencia de Barker:

$$\{+1 -1 +1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 -1 -1\}$$

La figura 1.12 muestra el aspecto de una señal de tres bits luego de haberle sido aplicada la secuencia de Barker.

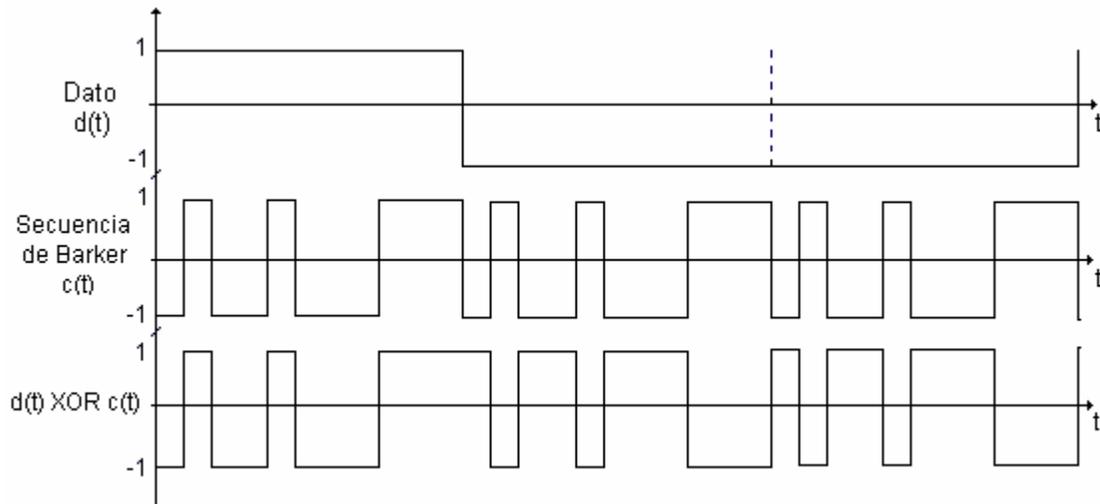


Figura 1. 11 Codificación de la información mediante la secuencia de Barker.

### 1.4.3 FHSS vs. DSSS

Escoger entre FHSS y DSSS depende tanto de las aplicaciones de usuarios como del entorno de operación del sistema. FHSS es ligeramente más resistente ante interferencias de sistemas similares, sin embargo consta de una baja razón de bit. DSSS, a los que algunos llaman "espectro extendido verdadero"<sup>5</sup>, es extremadamente vulnerable a los errores de codificación. En comparación con DSSS, FHSS es más seguro y se utiliza ampliamente en la esfera militar, dado que la frecuencia usada en DSSS es fija y proporciona una seguridad limitada. DSSS tiene, sin embargo, mejor aprovechamiento del ancho de banda y mayor alcance en comparación con FHSS, dado que asciende de 2 a 11 Mbps.

### 1.4.4 Multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM)

OFDM se diseña para minimizar la interferencia, o diafonía, entre los canales y los símbolos comprendidos en el flujo de datos. Es significativamente menos sensible a la

<sup>5</sup> True Spread Spectrum

interferencia intersímbolo dado que se emplea un grupo especial de señales para obtener la señal compuesta a transmitir. Con OFDM, una señal está repartida en varios canales de banda estrecha en diferentes frecuencias por lo que rompe con el límite de la velocidad binaria de datos hasta entonces, lográndose un tráfico de hasta 54 Mbps en las redes WLAN. Mientras OFDM ha sido escogido como método de transmisión para la radio europea (DAB), el estándar de televisión DVB-T, entre otros, 802.11a, 802.11g e HiperLAN/2 también usan OFDM en sus capas físicas. Los sistemas IEEE 802.11a (Wi-Fi5) tienen anchos de canal ligeramente más pequeños que los sistemas Wi-Fi para los 2.4 GHz. En general, la transmisión a una razón de datos más altas requiere mayor ancho de banda lo que conduce a pensar en cómo pueden los dispositivos 802.11a lograr razones de datos con una velocidad hasta 5 veces mayor que los sistemas Wi-Fi, a pesar de definir un ancho de banda ligeramente más estrecho. Esto se debe al uso de esquemas de modulación más complejos.

Los sistemas Wi-Fi, por ejemplo, emplean BPSK o QPSK, dependiendo en la tasa de datos transmitida. BPSK emplea dos fases (0 y 180°) para transmitir la información donde cada fase (o símbolo) corresponde a un bit de dato (0 ó 1). Con QPSK, se utilizan cuatro fases (0, 90, 180, y 270°) y cada símbolo representa *dos* bits de información (00, 01, 10, u 11), con lo que se dobla la razón de datos y se mantiene el mismo ancho del canal.

IEEE 802.11a también utiliza la modulación BPSK y QPSK para lograr las tasas de datos hasta los 18 Mbps. Para tarifas más altas (18–54 Mbps), se utiliza la modulación de amplitud en cuadratura (QAM, *Quadrature Amplitude Modulation*). QAM varía tanto la amplitud como la fase para codificar más bits en cada símbolo. Con 16QAM, son posibles dieciséis combinaciones diferentes de amplitud y fase. Cada símbolo representa cuatro bits de datos. Por extensión, con 64QAM, cada símbolo representa seis bits de información, con lo se logra transmitir seis veces más datos que un sistema que emplee la modulación BPSK dentro del mismo ancho del canal. Evidentemente, los esquemas más complejos de modulación requieren mayor energía de señal para una operación confiable.

## **1.5 Bandas de frecuencia para redes WLAN**

Los operadores de redes WLAN, no requieren de aprobaciones estatales para incorporarse al mercado. Actualmente, la mayoría de los países no solicitan licencias para el uso de las bandas ISM, y en algunos estados europeos toman en consideración

que solamente los operadores de telecomunicaciones licenciados por el gobierno, pueden tutorar redes WLAN. Sin embargo, es importante mencionar que la operación sin licencia significa que los dispositivos no deben causar interferencia perjudicial a otros y que deben aceptar cualquier interferencia recibida.

Este problema pudo reducirse con el advenimiento de las tecnologías de los 5 GHz, así, estándares como el IEEE 802.11a fueron adoptados con preferencia y como una mejor alternativa a la ya saturada banda de los 2.4 GHz. Sin embargo, esta norma opera en un rango de frecuencia ocupado por los sistemas de radar del gobierno de los Estados Unidos, por ejemplo, y están enfrentando preocupaciones similares por otros usuarios del espectro. Lamentablemente, las bandas ISM no pueden proporcionar una calidad definida, puesto que el entorno inalámbrico es intrínsecamente imprevisible.

### 1.5.1 Diferencias en la banda de 2.4 GHz

Existen diversas frecuencias adoptadas en la banda de los 2.4 GHz, explotadas por las redes WLAN, en los países europeos, Estados Unidos y Japón, de forma general. Cualquier producto con fines inalámbricos, debe resolver los requisitos funcionales en el país donde es vendido. Por ejemplo, la tabla siguiente demuestra la diversa gama de frecuencia utilizadas por las aplicaciones de la capa física referente a la tecnología FHSS. Dentro de los rangos ilustrados, hay grupos de saltos de frecuencia definidos para el funcionamiento de redes WLAN. Dependiendo del país donde la red inalámbrica opere, existe un número específico de canales a ser usados en cada conjunto de salto.

Tabla 1.2 Rangos de frecuencia de operación para la banda de 2.4 GHz.

Zona Geográfica	Límite Inferior ( GHz)	Límite Superior ( GHz)	Rango Regulado ( GHz)
Norte América	2.402	2.480	2.400-2.4835
Europa	2.402	2.480	2.400-2.4835
Japón	2.473	2.495	2.471-2.497
España	2.447	2.473	2.445-2.475
Francia	2.448	2.482	2.4465-2.4835

*Fuente: WLANA (Wireless LAN Association)*

Cada región requiere una cifra de canales de operación al hacer uso del estándar IEEE 802.11. Así, por ejemplo, Estados Unidos y un gran número de países europeos, operan con 79 selecciones de saltos, y España y Francia con 27 y 35, respectivamente.

En la tabla 1.4, se muestra una lista de frecuencias centrales y su número de canal correspondiente para las tres regiones especificadas, que, dentro del mercado internacional, están consideradas como las principales en la implementación de la tecnología DSSS en los 2.4 GHz.

Tabla 1.3 Frecuencias para operadores DSSS en diferentes regiones.

Canal	Frecuencia (GHz)	USA	Canadá	Europa	España	Francia	Japón
1	2.412	X	X	X	-	-	-
2	2.417	X	X	X	-	-	-
3	2.422	X	X	X	-	-	-
4	2.427	X	X	X	-	-	-
5	2.432	X	X	X	-	-	-
6	2.437	X	X	X	-	-	-
7	2.442	X	X	X	-	-	-
8	2.447	X	X	X	-	-	-
9	2.452	X	X	X	-	-	-
10	2.457	X	X	X	X	X	-
11	2.462	X	X	X	X	X	-
12	2.467	-	-	X	-	X	-
13	2.472	-	-	X	-	X	-
14	2.484	-	-	-	-	-	X

Fuente: WLANA

En el Anexo I se muestran las regulaciones del espectro y la potencia para esta banda de frecuencia, según la regulación de algunas naciones.

### 1.5.2 Bandas de frecuencias disponibles en los 5 GHz

Internacionalmente, se dispone de bandas de frecuencia en los 5 GHz para los servicios WLAN, las cuales se especifican para determinadas zonas geográficas. Cada país adopta, según sus necesidades y particularidades, límites diferentes dentro de esta banda espectral, con especificaciones estipuladas por sus respectivas organizaciones, encargadas de la asignación y el control de la frecuencia en cada región.

El Anexo I es un resumen general de las bandas de frecuencia que han sido dispuestas para esta zona del espectro. Estas bandas están incluidas en la agenda de la Conferencia Internacional de Radiocomunicaciones del año 2003 (WRC-2003).

# Capítulo 2



## **Capítulo 2**

### ***Radiopropagación en Redes Inalámbricas***

Las ecuaciones de Maxwell apoyan el estudio de la propagación de las ondas de radio a través de disímiles entornos. Lamentablemente, estos métodos se tornan engorrosos cuando son llevados a una situación práctica, lo que conlleva a la necesidad de recurrir a modelos de predicción de pérdidas de propagación simplificados y expresiones empíricas o curvas de propagación normalizadas obtenidas a partir de mediciones prácticas.

Evidentemente, las particularidades de la propagación de una onda están condicionadas por múltiples factores, desde los obstáculos y características eléctricas del terreno, hasta las propiedades físicas del medio, así como en dependencia de la polarización de la onda de radio.

#### **2.1 Radiopropagación**

Constituye un objetivo fundamental ofrecer una visión general de los principales modelos de propagación definidos para interiores y exteriores, y de esta forma familiarizarse con las expresiones más utilizadas y las diferentes suposiciones que se realizan, enfocados en las comunicaciones inalámbricas en redes WLAN a las frecuencias de 2.4 y 5 GHz fundamentalmente.

##### **2.1.1 Términos y definiciones**

La propagación es un tema relativamente complejo. Para una mejor comprensión sobre el tema que se aborda, es importante definir sus conceptos comunes respectivos a las redes inalámbricas.

##### ***Espectro***

Como se ha venido refiriendo, las redes inalámbricas WLAN explotan las bandas de los 2.4 y 5 GHz. La primera se ubica en UHF (*Ultra High Frequency*), comprendida entre los 300 y 3000 MHz ( $100 < \lambda < 10\text{cm}$ ) y la segunda en SHF (*Super High Frequency*), entre 3

y 30 GHz ( $10 < \lambda < 1\text{cm}$ ), por lo que las redes en cuestión asumen pequeñas longitudes de onda de la señal, resultando 12,5 y 6 cm respectivamente según la expresión:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.1)$$

donde  $c$  es la velocidad de la luz igual a  $3 \cdot 10^8$  m/s y  $f$  la frecuencia en Hz.

### **Clasificación de los entornos**

El rendimiento de una red WLAN es altamente dependiente del entorno físico circundante, el cual puede clasificarse en elementos estáticos y dinámicos. Los primeros abarcan una variedad de materiales naturales y artificiales, límites geométricos y configuraciones espaciales de movimiento nulo. Los elementos dinámicos abarcan las entidades móviles, frecuentemente, por ejemplo, los autos para exteriores y las personas en interiores.

De acuerdo a sus cualidades, el entorno puede clasificarse en *interior* o *exterior*. Cuando se hace uso de estos términos, se refiere a los vocablos anglosajones “*indoor*” y “*outdoor*”, respectivamente. De igual forma, en dependencia a la zona de cobertura, la cual es subdividida en otras áreas más pequeñas o células, se clasifican de acuerdo a su radio.

#### **Interiores**

En estos entornos, las distancias entre el transmisor y el receptor deben ser relativamente cortas, tanto por la elevada atenuación que existe como por la baja potencia de los equipos utilizados. La predicción de las características de propagación entre dos antenas situadas en el interior de una edificación, es tan importante en el diseño de una red inalámbrica como lo es detallar las posibles interferencias electromagnéticas ocasionadas por el equipamiento electrónico de la zona.

Para interiores son comunes los obstáculos, cuyas múltiples propiedades hacen complicados los análisis de propagación a la hora de definir el comportamiento de la onda, producto a las paredes y pisos, ventanas y puertas, objetos de oficina, etc.

Para las redes WLAN, típicas de entornos interiores, las variaciones o desplazamientos temporales del canal son relativamente lentos o nulos en comparación con los canales en exteriores y en otras modalidades de las comunicaciones móviles.

### **Exteriores**

Es importante resaltar que las redes WLAN, se conciben en sus inicios como una alternativa a las redes cableadas en interiores. No obstante, las numerosas aplicaciones actuales por las que se extienden las redes inalámbricas engloban ambos entornos si se toma en consideración las diversas peculiaridades de los medios *hot-spot* y las extensiones inalámbricas a redes remotas, entre las más explícitas.

Cuando se analizan coberturas exteriores en redes WLAN, no se requiere realizar un análisis de urbanización de la zona, ya que por lo general, se destina un área relativamente pequeña (cuando más unos centenares de metros) entre las que pueden citarse un parque de interés en una zona comercial, exteriores en un aeropuerto o en los alrededores de un hotel, etc.

Los enlaces punto-a-punto constituyen una particularidad de un entorno exterior, característico para puentes entre dos redes remotas, donde entra en consideración el análisis de la zona de Fresnel, la vegetación, el nivel de urbanización de la región (urbano, suburbano o rural) y la curvatura de la tierra entre otras particularidades, para así lograr alturas idóneas de las antenas transmisora y receptora.

### **Clasificación de las células**

La zona de cobertura deseada es dividida en áreas más pequeñas llamadas células, a las que se asignan un cierto número de radiocanales monitoreados por sus respectivas estaciones bases.

Son clasificadas en tres tipos generales: macros, micros y pico-células. La bibliografía difiere en la definición de las mismas en cuanto a sus límites de cobertura. En la tabla 2.1 se ilustra las clasificaciones típicas de una célula y sus dimensiones según el COST-231. Aunque este tipo de clasificación es típica de redes con un carácter móvil mucho más enfatizado, es habitual destinar la aplicación de los modelos de propagación en dependencia de esta categorización. Para las redes WLAN, es normal referirse a las dimensiones correspondientes a una pico-célula. Generalmente los servicios de redes locales inalámbricas están dirigidos a una cobertura no mayor de los 500 m aunque, dada

la variedad de intereses, en ocasiones puede hacerse referencias a extensiones típicas de una micro-célula para entornos exteriores.

Tabla 2.1 Clasificación típica de una célula

Tipo de célula	Radio	Posición de la antena de la estación base
<b>Macro-célula</b> (extensa)	1Km – 30 Km	Exterior Montada sobre un nivel medio del tejado, las alturas de todos los edificios circundantes están por debajo de la altura de la antena de la estación base
<b>Macro-célula</b> (pequeña)	0.5 Km – 3 Km	Exterior Montada sobre un nivel medio del tejado, las alturas de algunos edificios circundantes están por debajo de la altura de la antena de la estación base
<b>Micro-célula</b>	Hasta 1 Km	Exterior Montada por debajo de nivel medio del tejado
<b>Pico-célula</b>	Hasta 500 m	Interiores y exteriores Montada por debajo del nivel del tejado

### **Línea visual**

La transmisión por radio requiere de una trayectoria clara entre las antenas, cualidad conocida como “línea visual” (*LOS, Line-of-sight*), que no es más que la trayectoria directa en el espacio libre entre dos puntos, sin obstrucciones entre ellos. En caso contrario, se reconoce el término “fuera de la línea visual” (*NLOS, Non-Line-of-sight*) cuando la visibilidad entre el transmisor y el receptor es bloqueada completamente. Para una obstrucción parcial, algunas bibliografías se refieren al término “línea visual obstruida” (*OLOS, Obstructed-line-of-sight*) para los casos en los que el mobiliario, por ejemplo, se interpone parcialmente entre los extremos.

### **Zonas de Fresnel**

Cuando se calcula la elevación mínima para la colocación de la antena con el objeto de asegurar una LOS en un enlace punto-a-punto, se debe tener en cuenta una consideración de suma importancia. La propagación de las ondas de radio entre los dos puntos no es en línea recta sino que, debido a consideraciones de dispersión, se realiza en un área elíptica que rodea la línea del pasaje visual entre los dos puntos a interconectar. Esto es lo que se conoce como Zonas de Fresnel para una onda de radio,

formas elípticas que rodean la trayectoria visual. Las dimensiones de las mismas varían en dependencia de la longitud del recorrido y la frecuencia de la señal, con un radio determinado a partir del índice (n) su zona correspondiente:

$$r_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (2.2)$$

donde  $r_n$  es el radio de la n-ésima zona de Fresnel,  $\lambda$  la longitud de onda de la señal y  $d_1$  y  $d_2$ , las distancias respectivas al plano en cuestión (Fig. 2.1).

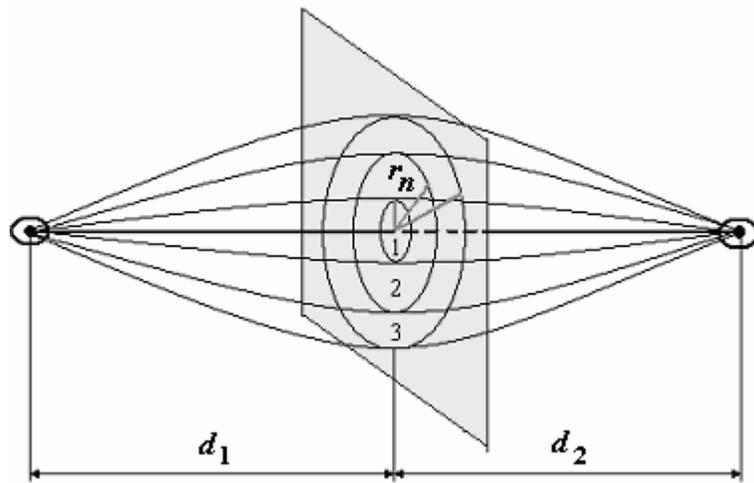


Figura 2.12 Corte tarsnversal a las zonas de Fresnel.

Si un objeto, ya sea una edificación o cualquier elevación topográfica, está también cerca del recorrido de la señal de radio, puede dañarla o debilitarla, independientemente se oscurezca o no la línea visual directa. El estándar de la industria es el de mantener alrededor del 60% de la primera zona de Fresnel libre de cualquier obstáculo, aunque también se operan con cifras aproximadas entre los 70 y 80% para los mejores casos.

### 2.1.2 Mecanismos de propagación

Es trascendental tener en cuenta los diversos mecanismos de propagación dado el papel relevante que desempeñan en el análisis de la cobertura de la señal.

En un ambiente interior, existen numerosas obstrucciones con características específicas que determinan directamente el comportamiento de la señal:

- Materiales de metal, capaces de reflejar las señales de radio, obstruyendo su paso considerablemente. Una habitación con varios objetos metálicos en su interior puede provocar desvanecimientos multitrayecto, el que será abordado posteriormente.
- Materiales plásticos, de madera, cristal y otros típicos en la construcción, con la propiedad de reflejar una parte de las señales de radio y permitiéndole el paso a otro por ciento de ella.
- Materiales con alto contenido de humedad, caracterizados por absorber un elevado por ciento de señal.

### ***Reflexión, refracción y absorción***

Cuando las ondas a partir de un medio golpean sobre la superficie de otro, una porción de energía de la onda se refleja dentro del primer medio mientras que otra es transmitida o refractada en el segundo, y aún una tercera porción es absorbida. Mientras los conductores perfectos reflejan toda la señal (Fig. 2.2a), otros materiales reflejan sólo parte de la energía de la onda incidente y transmiten el resto (Fig. 2.2b).

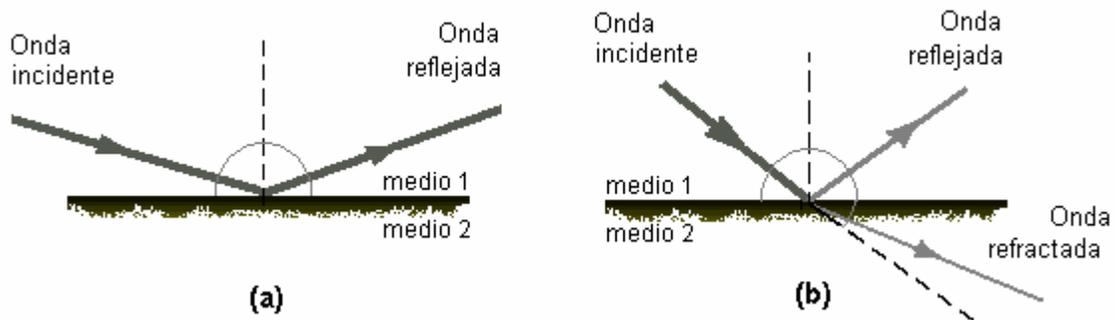


Figura 2.13 Fenómenos de reflexión y refracción.

La reflexión y la refracción son dos de los mecanismos más prominentes de la propagación de onda en interiores. Las paredes, pisos, techos, muebles y múltiples equipos, constituyen un medio típico para estos casos.

Este fenómeno depende de propiedades tanto físicas (superficies geométrica, textura, grosor y composición del material) como de la señal (ángulo incidente, orientación, polarización, y longitud de onda). De aquí que un conductor perfecto refleja el 100% de la

energía incidente mientras que un dieléctrico, por ejemplo, refleja parte de la energía dependiendo del ángulo de la incidencia, y refracta el resto. Para un ángulo de incidencia cercano a  $0^\circ$ , la onda es reflejada en su totalidad, en cambio, para uno cercano a los  $90^\circ$ , está se refracta. En general, un material refleja parte de energía, refracta otra parte y absorbe el resto.

La reflexión también introduce un desplazamiento de fase de  $180^\circ$  que determina el efecto de distorsión multitrayecto.

## ***Difracción***

Ni la reflexión ni la refracción pueden explicar la propagación de la onda en áreas de sombra. El frente de onda difractado se forma cuando la señal transmitida es obstruida por bordes agudos dentro de la trayectoria. Cuando las ondas golpean los bordes abruptos de un obstáculo, se generan ondas secundarias que bordean su contorno (Fig. 2.3). Básicamente, el principio de Huygen explica este fenómeno, ante el cual todos los puntos en un frente de onda son capaces de actuar como generadores de ondas secundarias.

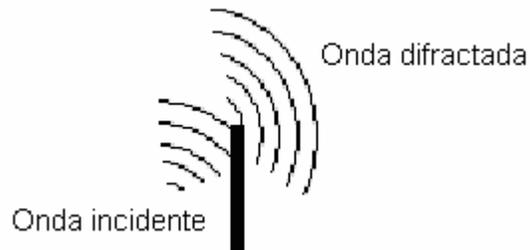


Figura 2.14 Difracción de una señal.

Consecuentemente, la señal difractada resultante depende de la geometría del borde y su orientación espacial, así como de las propiedades de la señal (amplitud, fase y la polarización).

El defasaje considerado por la onda debido a la difracción, depende del exceso de distancia recorrida por ellas para alcanzar el receptor.

## ***Dispersión***

Si hay muchos objetos en el recorrido de la onda y estos son pequeños respecto a la longitud de onda de la señal, entonces el frente de onda propagado se fragmentará en

diversas direcciones. Dada las longitudes de onda típicas en redes inalámbricas, 125 y 60mm para 2.4 y 5 GHz respectivamente, múltiples objetos comunes pueden conducir a la dispersión.

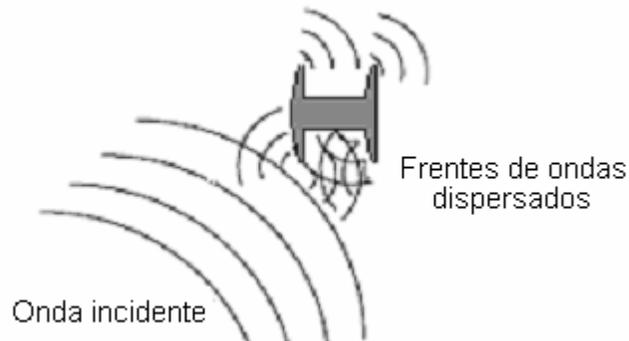


Figura 2.15 Dispersión en una viga de hierro.

La mayoría de las edificaciones modernas constan de vigas de acero como sostén en sus estructuras internas y al igual que las superficies rugosas de objetos y paredes, pueden contribuir en el efecto de dispersión (Fig. 2.4). El factor de pérdidas por dispersión es, típicamente, modelado mediante una distribución Gaussiana o a través de técnicas estadísticas.

### 2.1.3 Distorsión, interferencia y ruido

Los miembros transmisor, receptor y sus respectivas antenas, contribuyen positivamente en a la radiocomunicación. El medio de transmisión introduce, en cambio, pérdidas y diversos tipos de perturbaciones tales como distorsión, ruido e interferencia (Fig. 2.5).

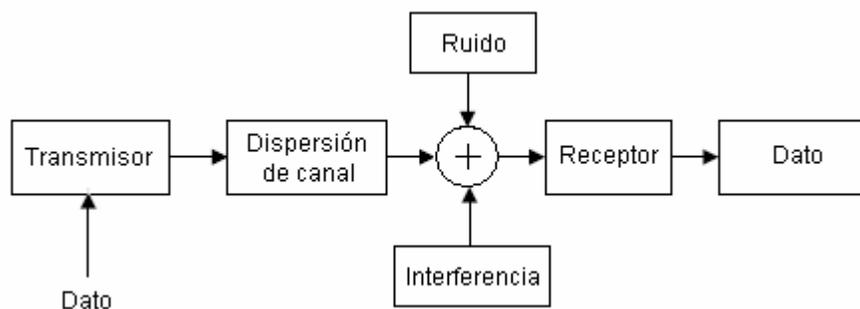


Figura 2.16 Factores que afectan la señal de radio.

Producto a las características intrínsecas de propagación de las ondas radioeléctricas es usual que en el receptor estén presentes, no sólo la señal procedente del transmisor correspondiente (señal deseada), sino, además, diversas señales emitidas para otros destinos y desde emisores no correspondientes (señal interferente o no deseada). El alcance útil o cobertura de una emisión radioeléctrica depende del tipo de intensidad de cada perturbación.

La potencia extraída de la onda radioeléctrica por el receptor, debe competir con la potencia de ruido e interferencia. Estas dependen de numerosos factores que varían en función de la frecuencia y el ancho de banda de la emisión, localidad y características del entorno, incluso de la hora del día y la estación del año.

Consecuentemente, se define como umbral de calidad a la relación mínima admisible entre la potencia de la señal útil y la potencia equivalente de ruido e interferencia.

Las redes WLAN comparten un espectro común a otras tecnologías en la banda de los 2,4 GHz. Sin embargo, gracias a la técnica SS, se ha facilitado que múltiples usuarios compartan el mismo espectro, sin requerimientos de licencia y con un relativo rechazo a las interferencias. Dentro del espectro, en los alrededores de los 5 GHz, también se requiere de un análisis y un adecuado control de su explotación dado que es frecuente su uso en los sistemas de radares y satelitales para determinadas regiones.

## ***Distorsión***

La distorsión es un tipo de perturbación inducida por la propagación de la onda radioeléctrica, generada por anomalías en dicha propagación. En algunas bibliografías es usual no manejar este término independiente del fenómeno de interferencia.

### ***Distorsión multitrayecto***

Normalmente, varias versiones de la misma onda viajan a través de las múltiples trayectorias y mecanismos antes de alcanzar el receptor (Fig. 2.6). De acuerdo con los desplazamientos de fase, estas ondas pueden combinarse en el receptor y conducir a una interferencia constructiva o destructiva. La primera ocurre cuando la señal resultante se origina a partir de contribuciones con iguales fases, y consecuentemente con una fuerza mayor que sus componentes individuales. En cambio, la segunda ocurre a partir de contribuyentes con fases opuestas, originando una señal débil. La fase exacta de un

componente multitrayecto está determinada por la longitud de la distancia recorrida y el número de mecanismos de propagación desafiados.

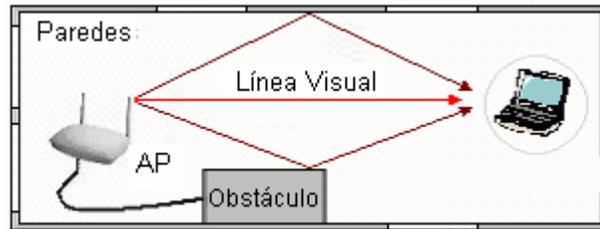


Figura 2.17 Multitrayecto.

La figura 2.7 muestra una típica respuesta de impulso medida en un entorno interior.

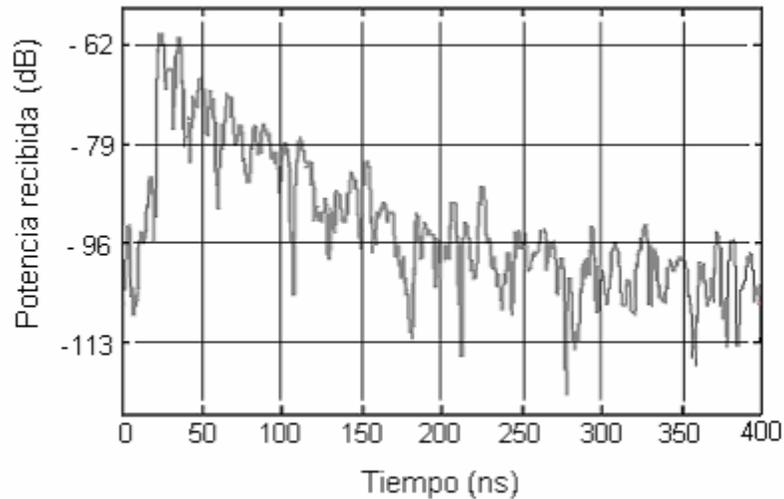


Figura 2 18 Respuesta instantánea de impulso.

### ***Distorsión de intermodulación***

Es una distorsión no lineal de un sistema o un transductor, caracterizada por la presencia en la salida de frecuencias iguales a las sumas y a las diferencias de los múltiplos integrales de dos o más componentes de frecuencias presentes en la entrada, donde, por ejemplo, si hay una suma de dos ondas coseno ( $\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t$ ), la salida incluirá todos los armónicos de  $f_1$  y  $f_2$ , más los términos  $f_2 - f_1$ ,  $f_2 + f_1$ ,  $f_2 + 2f_1$ , etc. [Carlson, *et al*, 2002].

## ***Interferencia***

La interferencia de radiofrecuencia requiere de una atención mesurada en el diseño, la operación y el mantenimiento de los sistemas de comunicaciones inalámbricos.

Cuando el nivel de interferencia prevalece por encima del de ruido, se habla de cobertura limitada por interferencia y se establece un alcance de cobertura en función de la relación de potencias entre la señal deseada y la señal interferente total, denominada relación de protección, también para una calidad de recepción específica.

### ***Interferencia de canal adyacente***

Se produce a partir de las señales que son contiguas en frecuencia a la señal deseada. La interferencia de canal adyacente es consecuencia de los filtros defectuosos con poca selectividad en el receptor, lo que trae aparejado que las frecuencias próximas se escapen en la banda de paso.

### ***Interferencia co-canal***

La interferencia co-canal o en el mismo canal cae dentro del ancho de banda del receptor involucrado y surge fundamentalmente a partir de transmisores que usan la misma banda, debido a una fuente modulada o no, de frecuencia próxima a la de la portadora deseada.

### ***Interferencia Intersímbolo***

La interferencia intersímbolo (ISI, *Intersymbol Interference*) es una perturbación propia de los sistemas digitales y se produce cuando, en el momento del muestreo, la señal resultante se afecta por residuos de los símbolos anteriores y preludios de los símbolos siguientes [Hernando, 1995]

## ***Ruido***

Un caso particular de señal no deseada es la perturbación debida al ruido, que puede ser de origen natural (radiación de cuerpos cósmicos, ruido atmosférico, etc.) o artificial (proveniente de motores, vehículos y otros equipos ruidosos).

El término ruido se refiere además a las señales eléctricas no deseadas, siempre presentes en los sistemas eléctricos. La presencia del ruido sobrepuesto en una señal

tiende a oscurecer o enmascarar la señal, limitándose la razón de transmisión de información y la capacidad de los receptores para tomar decisiones correctas entre símbolos.

Cuando solo interviene el ruido, se habla de cobertura limitada por ruido y el umbral suele expresarse como la potencia mínima necesaria para una cierta calidad de recepción, aunque no suele ser la más usual y menos en implementaciones de redes WLAN, generalmente destinadas a interiores en zonas de estudio y trabajo computarizado, donde los niveles de ruido, en dependencia de las características del entorno, suelen ser muy bajos.

### ***Ruido térmico***

El ruido térmico se refiere al movimiento de los electrones en todos los componentes disipantes (resistores, cables, etc.) y de los elementos activos como por ejemplo un amplificador. Mientras más caliente sea una fuente, más rápidamente se retirarán los electrones de sus órbitas, resultando un aumento en el nivel de ruido. Los mismos electrones que son responsables de la conducción eléctrica son también responsables del ruido térmico.

### ***Ruido industrial***

Es considerado un ruido de carácter artificial y como bien sugiere su nombre, es el ruido proveniente de los diversos aparatos con motores eléctricos (vehículos, aviones, maquinarias industriales en zonas aledañas, etc.). A menudo se caracteriza por tener polarización vertical, lo que trae como consecuencia que las antenas con polarizaciones horizontales son menos sensibles a esta clase de ruido que las polarizadas verticalmente. No es significativo en las frecuencias explotadas por las redes WLAN.

### ***Ruido atmosférico***

El ruido atmosférico procede fundamentalmente de las "tormentas" en la ionósfera y la atmósfera y especialmente a causa de las tempestades y descargas eléctricas, por lo que es considerado un ruido procedente de fuentes naturales. Suele ser de carácter impulsivo, con fluctuaciones de gran intensidad y rapidez.

### 2.1.4 Fundamentos de Friis para el enlace

La caracterización de un enlace radioeléctrico se realiza en términos de balances de potencia. Las pérdidas básicas de propagación  $l_b$ , es el resultado del cociente entre la potencia transmitida ( $p_t$ ) por una antena isotrópica y la potencia recibida ( $p_r$ ) por otra antena con características similares, en iguales unidades:

$$l_b = \frac{P_t}{P_r} \quad (2.3)$$

Para  $L_b$  en dB, se toma la diferencia de ambas potencias ( $P_t$  y  $P_r$ ) expresadas en forma logarítmica:

$$L_b = P_t - P_r \quad (2.4)$$

En los sistemas de radiocomunicaciones siempre interviene el medio de propagación. En cambio se estudia el caso ideal de propagación en espacio libre como referencia y en la determinación de la pérdida de propagación mínima que cabe esperar en un enlace. Consecuentemente, se van añadiendo términos de pérdidas adicionales en correspondencia a las características propias del medio de propagación [Hernando, 1995].

#### **Pérdidas básicas de propagación en espacio libre**

La propagación en condiciones de espacio libre se refiere a al definición de una trayectoria LOS entre el transmisor y el receptor, donde la única pérdida considerada es la atenuación de la señal en función de la frecuencia y la distancia entre los extremos.

Considerando a  $l_{bf}$  como la pérdida básica de propagación en condiciones de espacio libre, se tiene que:

$$l_{bf} = \frac{p_t}{p_r} = \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (2.5)$$

donde  $d$  es la distancia entre antenas y  $\lambda$  la longitud de onda correspondiente a la frecuencia de trabajo según la ecuación (2.1).

Expresando la ecuación (2.5) en dB y unidades prácticas se obtiene a  $L_{bf}$  como:

$$L_{bf} = 32.45 + 20 \log f \text{ (GHz)} + 20 \log d \text{ (m)} \quad (2.6)$$

Para las redes WLAN, a las frecuencias típicas de trabajo de 2.4 y 5 GHz, la ecuación (2.6) se reduce respectivamente a:

$$L_{bf} = 40.05 + 20 \log d \text{ (m)} \quad (2.7a)$$

$$L_{bf} = 46.43 + 20 \log d \text{ (m)} \quad (2.7b)$$

A partir de simulaciones en *MatLab* puede obtenerse la gráfica de pérdidas  $L_{bf}$  en función de la distancia correspondiente a las frecuencias deseadas, tal y como se muestra en el Anexo II–A.

Como método práctico para el cálculo de  $L_{bf}$  en enlaces punto-a-punto a distancias entre los 2 y 500 Km y frecuencia entre los 100 MHz y 30 GHz, se propone el uso del esquema mostrado en el Anexo II–B.

El modelo de Friis, en condiciones de espacio libre, calcula la potencia de la señal recibida en watt para la antena del receptor a una distancia  $d$  conocida desde el transmisor, a partir de las ganancias  $g_t$  y  $g_r$  de las respectivas antenas:

$$p_r = p_t g_t g_r \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (2.8)$$

Sustituyendo en la ecuación (2.8) el término cuadrático por las pérdidas básicas  $l_{bf}$  y expresando toda la expresión en unidades logarítmicas se obtiene:

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_{bf} \quad (2.9)$$

$$P_r = P_t + G_t + G_r - 32.45 - 20 \log f \text{ (GHz)} - 20 \log d \text{ (m)} \quad (2.10)$$

## ***Pérdidas por propagación en entornos reales***

En la práctica, dada las situaciones propias de propagación según el entorno analizado, el término real de pérdidas es mayor que el correspondiente al espacio libre a esas determinadas frecuencia y distancia.

En el cálculo de la potencia recibida para el caso en que se consideran las pérdidas reales por propagación, puede ser cuantificado por la ecuación (2.9), con la diferencia que el término referente a la atenuación en espacio libre es sustituido por otro obtenido a partir de condiciones prácticas:

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L \quad (2.11)$$

Ahora  $L$  es el resultado que se obtiene de acuerdo con las características propias del entorno y de alguna otra atenuación que se considere significativa. En el siguiente epígrafe se muestran varios de los métodos prácticos empleados en el cálculo de las pérdidas por propagación para la predicción de cobertura en las redes inalámbricas.

## **2.2 Modelos de propagación**

Para una adecuada modelación de la propagación de RF, es necesario idear un modelo que pueda predecir la cobertura de la señal proveniente de un punto de acceso. La modelación de la radiopropagación es el aspecto más complicado en el diseño de una red inalámbrica. De acuerdo con la disposición de edificios, muebles, equipos, paredes, pisos y puertas, e incluso de la presencia de personas, las características de la propagación pueden manifestarse de forma heterogénea y en relación con las peculiaridades del entorno. Además, por causa del efecto multirayecto, estas características pueden variar substancialmente con la distancia y el tiempo.

Los primeros tipos de modelos para el cálculo de coberturas radioeléctricas fueron incorporando procedimientos empíricos para la estimación de las pérdidas básicas de propagación y de la intensidad del campo recibida. Tales procedimientos están basados en amplias campañas de mediciones y en una posterior correlación de las medidas obtenidas con características descriptivas del entorno donde tiene lugar la propagación.

Los métodos empíricos proporcionan una estimación rápida y sencilla, sin embargo, el valor cuadrático medio del error entre el valor estimado por uno de estos métodos y el

valor medio real, puede llegar a ser, aproximadamente, del orden de los 10 a los 14 dB [Hernando,1995].

Dependiendo del método empleado para la obtención de las pérdidas medias, los modelos de propagación para interiores, pueden ser clasificados en:

- *Empíricos de banda estrecha*: modelos que solo predicen pérdidas de propagación y están basados en campañas de medidas.
- *Empíricos de banda ancha*: modelos que predicen la forma aproximada de los perfiles Potencia-Retardo (*Power Delay Profile*) en función de la dispersión del retardo (*delay spread*) promediado a partir de distintas medidas en entornos similares.
- *Predicción temporal*: modelos que predicen la variación temporal del canal.
- *Semi-deterministas*: modelos que intentan simular la propagación de las ondas de radio y que permiten caracterizar el canal tanto en banda estrecha como en banda ancha.

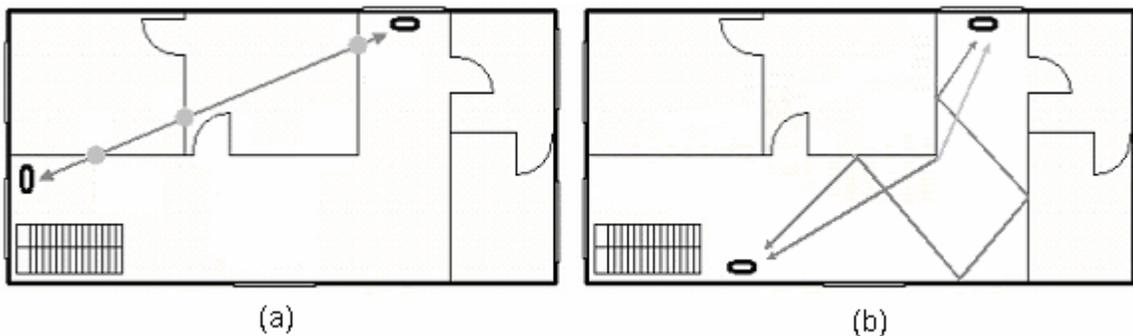


Figura 2.19 Aproximaciones de los modelos de propagación, (a) empíricos, (b) deterministas.

Para los modelos de propagación en exteriores, se admiten las siguientes clasificaciones:

- *Empíricos*: modelos basados en campañas de medidas.
- *Semi-empíricos*: modelos empíricos a los que añaden algunos mecanismos de propagación.
- *Deterministas*: modelos basados en el cálculo exacto de las ecuaciones que cuantifican las pérdidas debidas a la propagación, mecanismos de difracción, dispersión y reflexión.

- *Semi-deterministas*: no son modelos completamente deterministas, dado que se precisa de técnicas estadísticas para modelar algunos elementos físicos del entorno donde tiene lugar la propagación.

Los avances en la tecnología informática hace posible la obtención de modelos tridimensionales. De esta forma, no sólo se puede estudiar el nivel medio de la señal recibida a través del camino directo como se hace en los modelos bidimensionales, sino que también puede estudiarse procesos de reflexión y difracción. De aquí que los modelos de propagación también pueden ser clasificados en:

- *Bidimensionales*: del total de contribuciones que pueden llegar al receptor, solo consideran la principal, por lo que únicamente son capaces de obtener una predicción de la cobertura radioeléctrica.
- *Tridimensionales*: identifican el mayor número posible de contribuciones que pueden llegar al receptor a causa del fenómeno de multitrayecto: camino directo, difracciones en aristas, reflexiones, etc.

### **2.2.1 Enlace punto-a-punto**

En las redes WLAN, suelen diseñarse enlaces entre dos puntos distantes para interconectar redes o subredes que comparten servicios comunes o parte de ellos. Esta topología se emplea frecuentemente en extensas universidades para la conexión entre facultades y con otras entidades, en las comunicaciones con y entre objetivos turísticos apartados, en empresas con más de una edificación, entre otros menos comunes.

En esta modalidad de enlaces es importante detallar las características más significativas del terreno y el nivel de urbanización de la zona entre los extremos en cuestión, determinado la presencia o no de obstáculos que obstruyen la línea visual y el porcentaje de afectación de la zona de Fresnel.

De acuerdo con estos requisitos, en la tabla 2.2 se muestra un ejemplo sobre los requerimientos de altura para las antenas en correspondencia a las distancias requeridas según los sistemas Wi-Fi operando a 2.4 GHz (802.11b). H está referida a la altura por encima de cualquier obstáculo ubicado en el medio del pasaje RF, igual a la suma de la altura necesaria para garantizar un 60% libre en la zona de Fresnel (F) y el aporte dado por la curvatura de la tierra (C):

$$H = F + C \quad (2.12)$$

Tabla 2.2 Consideraciones Wi-Fi en los enlaces punto a punto para 2.4 GHz.

Distancia (Km)	Altura F (m) <sup>1</sup>	Altura C (m) <sup>2</sup>	Altura total H (m)
1.5	3	1	4
10	12	2	14
15	15	4	19
25	20	10	30
30	22	17	39
40	24	26	50

Fuente: Wi-Fi Alliance

<sup>1</sup> Altura por encima de una obstrucción.

<sup>2</sup> Dada la curvatura de la Tierra.

Es interesante ver como, haciendo uso de los mecanismos de propagación anteriormente analizados, puede orientarse una onda en dependencia de un interés dado. En presencia de una situación NLOS donde resulta imposible o costoso realizar un enlace directo, se puede orientar la señal hacia un obstáculo con características de reflexión adecuadas y con una correcta orientación hacia el objetivo. En zonas urbanas resulta común el empleo de edificios para tales fines.

En Cuba se hace uso de una *Hoja Excel Programada* para establecer enlaces punto-a-punto con tecnología *BreezeNet*. Con sólo proporcionar la distancia entre el transmisor y receptor y las características de las antenas empleadas, se obtienen los parámetros del enlace de acuerdo a la razón de datos especificada (entre uno, dos y tres megabits por segundo). En el Anexo IV se brinda una explicación más detallada de esta hoja de cálculo, la cual se adjunta a la versión digital del presente documento.

### 2.2.2 Modelos de propagación en interiores

En interiores, se manifiestan considerables diferencias a las condiciones en exteriores, dado que el entorno es mucho más determinante que la distancia entre las antenas. Las paredes, conjuntamente con pisos y techos, provocan grandes atenuaciones. El mobiliario y las estructuras metálicas incrustadas en las estructuras hacen que los procesos de dispersión y difracción sean más representativos que en exteriores.

De los cuatro modelos de propagación para estos entornos, mencionados con anterioridad, se ejemplificarán los empíricos de banda estrecha y los semi-deterministas.

### **Modelos empíricos de banda estrecha**

Los modelos empíricos de banda estrecha en interiores vienen expresados a través de ecuaciones matemáticas sencillas que dan como resultado una aproximación a las pérdidas medias de propagación entre las entidades involucradas en el enlace. En estas ecuaciones, comúnmente en función de la distancia, se optimizan una serie de coeficientes con valores obtenidos a partir de múltiples campañas de medidas realizadas. Evidentemente, este ajuste minimiza el error del modelo en una edificación donde se hayan realizado las medidas, pero en cambio, si el modelo es lo suficientemente bueno, puede ser útil para predecir de forma aproximada los resultados en construcciones con características similares.

A continuación, se abordan algunos modelos empíricos discutidos en COST-231 [Cichon, 1996] entre otros, y conjuntamente con ellos se ponen a disposición los diversos valores de sus parámetros logrados a partir de las distintas campañas de medidas que se han presentado por empresas prestigiosas y en las que han colaborado varias universidades y centros de investigación.

#### **Modelo de Pendiente Única (1SM)**

El modelo de Pendiente Única (1SM, *One-Slope Model*) cuantifica las pérdidas por propagación en dB a través de la ecuación:

$$L_{1SM} = L_0 + 10 n \log d(m) \quad (2.13)$$

donde  $L_0$  representa las pérdidas para una distancia de un metro y  $n$  es la pendiente, cuyo valor se ajusta de forma empírica, tratada en algunas bibliografías con el símbolo " $\gamma$ ".  $L_0$  puede tomar el valor que tendría en espacio libre o por el contrario, con el objetivo de obtener un mejor ajuste o minimización del error medio, puede ajustarse utilizando medidas prácticas en interiores. La pendiente de pérdidas  $n$  se ajusta con el logaritmo de la distancia, la cual será, de forma general, muy superior a la observada en espacio libre. Como puede notarse, los coeficientes a ajustar son fuertemente dependientes, no sólo de la estructura y los materiales de la edificación sino además del tipo de entorno en el que se realizan las medidas (pasillos, despachos, etc.).

La tabla 2.3 muestra una serie de valores típicos según las frecuencias de trabajo considerando a  $L_0 = L_{bf}$  referidos a un metro, a partir de la ecuación (2.6).

Tabla 2.3 Valores típicos para el modelo 1SM.

Características del Entorno	Frecuencia (GHz)	$L_o = L_{bf}(1m)$ (dB)	$n$
Oficina <sup>1</sup>	2.45	40.23	4.2
Pasillo <sup>1</sup>			1.2
Oficina <sup>2</sup>			3.5
Oficina <sup>3</sup>	2.50	40.41	3.7
Oficina <sup>4</sup>	5.00	46.43	3.5
Oficina <sup>3</sup>	5.25	46.85	4.6

Fuente: <sup>1</sup>[Válek, 2002] <sup>2</sup>[Tamminem, 2002] <sup>3</sup>[Cheung, 2002] <sup>4</sup>[Tarokh, 2002]

### Modelo de Pérdidas Log-distancia

En algunas bibliografías puede notarse como se hace uso de una extensión del modelo 1SM, acomodando un término  $d_o$  a la ecuación (2.13):

$$L_{LPLM} = L_o(d_o) + 10n \log(d/d_o) + X_\sigma \quad (2.14)$$

Esta expresión es la base del Modelo de Pérdidas Log-distancia (*Log-distance Path Loss Model*), donde  $d_o$  es un valor en metros, tomado como referencia (nótese que para un metro se está en presencia del modelo 1MS) y debe siempre referirse al campo lejano de la antena de modo que los efectos del campo cercano no puedan alterar la pérdida de referencia  $L_o(d_o)$ , cuyo valor corresponde a  $L_{bf}(d_o)$ , y un último sumando  $X_\sigma$ , variable gaussiana aleatoria que se adiciona para expresar los efectos por ensombrecimiento cuando hay objetos que bloquean la trayectoria LOS entre el transmisor y el receptor, con un valor medio igual a cero y una desviación estándar  $\sigma$  (dB). La adición de un término aleatorio gaussiano es una forma simplista de explicar una obstrucción imprevisible y son escasos los textos que hacen alusión a él. En lo general, se ajusta el exponente a situaciones LOS y NLOS.

En los laboratorios *Intel (Intel Corporation)*, se experimentaron varias simulaciones comparando las bandas explotadas por las redes WLAN, para un entorno residencial, pero con posibilidades de extrapolarlo a situaciones prácticas de oficina. En la tabla 2.4 se muestran los resultados luego de haber aplicado este modelo [Cheung, 2002].

Tabla 2.4 Exponente de pérdidas y desviación estándar para las bandas WLAN.

Banda	LOS		NLOS	
	$n$	$\sigma$ (dB)	$n$	$\sigma$ (dB)
2.4 GHz	1.91	3.15	3.73	4.35
UNII-I	1.83	3.17	4.70	4.55
UNII-II	1.72	2.93	4.48	4.34
UNII-III	2.15	3.00	4.59	5.01

Fuente: Intel Corp.

En general, puede considerarse un valor de  $n$  aproximado a 1.9, en condiciones LOS, para ambas frecuencias típicas en redes WLAN. En entornos NLOS, los mejores exponentes, sobre una gama de 3 a 14 m son 3.7 y 4.6 para las bandas de 2.4 y 5 GHz, respectivamente.

De igual forma, se resume que las pérdidas de la propagación, causadas por una pared, son de aproximadamente 4.2 dB mayores para la banda de 5 GHz en comparación con la de los 2.4, así como las pérdidas a través del suelo resultan 1.5 dB mayores.

### Modelo de Pendiente Doble (DSM)

Como bien puede inferirse, a diferencia del primer método, ahora se ajustan dos pendientes o exponentes a partir de mediciones prácticas, de allí su nombre Modelo de Pendiente Doble (DSM, *Dual-Slope Model*, también llamado *Two-Slope Model*):

$$L_{DSM} = \begin{cases} L_0(d_0) + 10 n_1 \log(d/d_0) & d_0 \leq d \leq b, \\ L_0(d_0) + 10 n_1 \log(b/d_0) + 10 n_2 \log(d/b) & b < d < \infty \end{cases} \quad (2.15)$$

donde  $b$  la distancia en metros al punto de ruptura (*breakpoint*) y  $d_0$  es un valor tomado como referencia, ambas en metros, y  $n_1$  y  $n_2$  las pendientes antes y después del punto de ruptura respectivamente.

La distancia  $b$ , depende de las alturas del AP ( $h_B$ ) y la estación receptora ( $h_m$ ) sobre el plano de tierra:

$$b = \frac{4h_B h_m}{\lambda} \quad (2.16)$$

En un documento oficial, D3.3, del proyecto IST-2000-28584 MIND, “Metodologías para Identificar los Requerimientos del Espectro para Sistemas más allá de los 3G” [Böhnke, 2002], se considera a este modelo como una alternativa más realista en condiciones de entornos pequeños, donde es común enfrentarse a situaciones NLOS, dado que realiza el ajuste de dos exponentes en función de las características de propagación en un ambiente de micro-celda.

### **Modelo de Pared Múltiple (MWM)**

El modelo MWM (*Multi-Wall Model*) está basado en el de Motley-Keenan [Montley, 1990], de la *British Telecom*. Procura ser más realista que el anterior, tomando en consideración las pérdidas adicionales que introducen las distintas paredes y suelos atravesados por la señal entre el transmisor y el receptor.

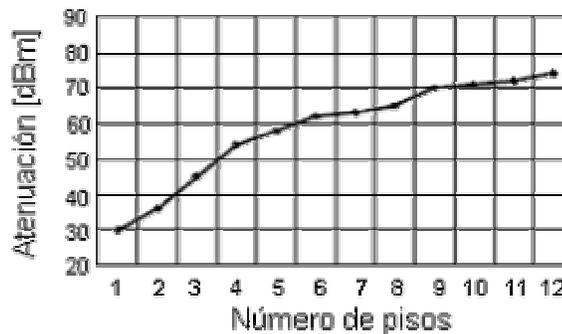


Figura 2.20 Atenuación aproximada según aumenta el número de pisos.

Se ha demostrado que las pérdidas durante la propagación comienzan a aumentar de forma no lineal al aumentar el número de pisos. La siguiente figura muestra una aproximación para un ejemplo típico. Este es el motivo por el que adiciona un factor empírico  $b$  al modelo Motley-Keenan con un valor de 0.46 unidades. Cuando el tamaño de los edificios es pequeño este factor puede despreciarse de la ecuación de pérdidas.

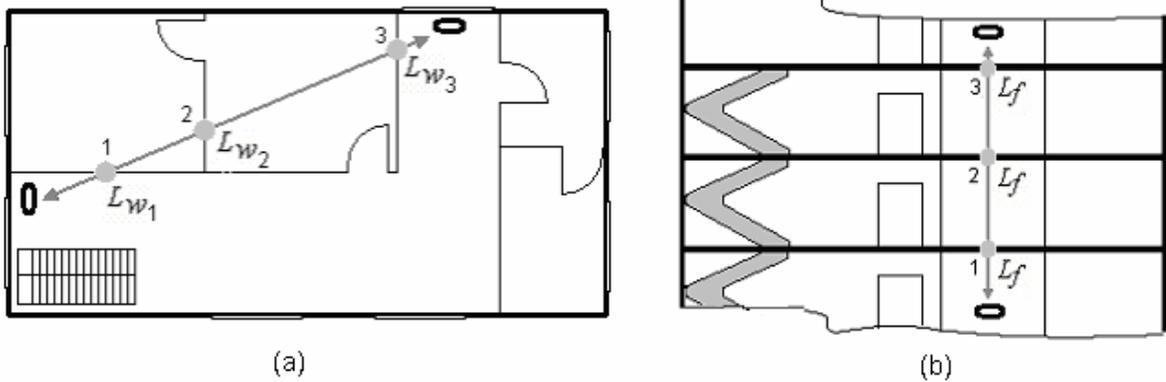


Figura 2. 21 Principio del modelo MWM, (a) en paredes, (b) en pisos.

Considérese a  $L_{w1}$ ,  $L_{w2}$  y  $L_{w3}$  las atenuaciones que sufre la señal al atravesar las paredes por los puntos 1, 2 y 3 respectivamente, a partir de la figura 2.10a. Si se toman como iguales las consistencias de los paneles atravesados, se pueden considerar como similares las atenuaciones experimentadas para un total  $k_w L_w$  donde  $k_w$  es igual a tres y equivalente al número de paredes penetradas.

A partir de la figura 2.10b, se observa como puede realizarse un análisis similar al anterior, ahora para un número  $k_f$  de pisos con atenuación  $L_f$ . Dado los análisis anteriores, se arriba a la ecuación que cuantifica la atenuación media en dB según este modelo:

$$L_{MWM} = L_{bf} + L_C + \sum_{i=1}^N k_{wi} L_{wi} + k_f \left( \frac{k_f + 2}{k_f + 1} - b \right) L_f \quad (2.17)$$

donde además  $L_C$  es un coeficiente de ajuste según las mediciones y suele tomar valores cercanos a cero,  $L_{bf}$  representa las pérdidas en espacio libre pudiendo unirse al anterior para simplificar el modelo,  $N$  el número de paredes diferentes a considerar y  $b = 0.46$  para propósitos generales.

Para el COST-231, es habitual hacer uso de sólo dos modalidades de pared:

- *Pared fina* ( $L_{w1}$ ): Pared sin cargas (menor a 10 cm), cartón, yeso, tablero delgado, pared ligera de concreto, etc. Bajo coeficiente de pérdidas.
- *Pared gruesa* ( $L_{w2}$ ): Pared con cargas o gruesa (más de 10 cm), concreto, ladrillo, etc. Alto coeficiente de atenuación.

Suele considerarse una tercera nominación para paredes metálicas ( $L_{w3}$ ). Normalmente, la atenuación aportada por el piso puede ser alrededor de los 20 dB.

Actualmente, se tienen los resultados de múltiples campañas de medidas basadas en las pérdidas a través de diversos materiales para WLAN, según puede observarse en la tabla 2.5.

Tabla 2.5 Pérdidas promediadas por penetración en redes WLAN

Obstrucción	Pérdidas (dB)
Espacio abierto	0
Ventanas (no metálicas)	3
Ventanas (metálicas)	5 – 8
Pared fina ( <i>drywall</i> )	5 – 8
Pared media (madera)	10
Pared gruesa (núcleo sólido 6")	15 – 20
Pared muy gruesa (núcleo sólido 12")	20 – 25
Piso/techo (núcleo sólido)	15 – 20
Piso/techo (núcleo sólido grueso)	20 – 25

Fuente: Ericsson

En la tabla siguiente se muestran valores prácticos para el uso de este modelo. El valor de  $n$  proporcionado es tomado para asumir que  $L_C = 10 n \log(d)$ .

Tabla 2.6 Valores típicos para el modelo MWM.

Características del Entorno	Frecuencia (GHz)	$L_{bf}$ (dB)	$L_{w1}$ (dB)	$L_{w2}$ (dB)	$L_{w3}$ (dB)	$n$
Oficina <sup>1</sup>	2.45	40.23	5.9	8.0	4.1	2
Oficina <sup>2</sup>			6.0	-	-	-
Paredes Finas <sup>3</sup>	2.50	40.41	5.4	-	-	2
Oficina	5.00	46.43	6.5	11.7	-	-

Fuente: <sup>1</sup>[Válek, 2002] <sup>2</sup>[Tamminem, 2002] <sup>3</sup>[Anderson, 2002]

En la Universidad de Cataluña, el Grupo de Comunicaciones Móviles y Banda Ancha (Dep. de Matemática Aplicada y Telemática) realizó un estudio sobre las atenuaciones que incorporan las diferentes obstrucciones a 2,4 GHz, proporcionando una detallada caracterización de los obstáculos analizados. La siguiente tabla muestra los resultados:

Tabla 2.7 Resultado experimental a 2.4 GHz.

Tipo de obstáculo	Número de medidas	Atenuación media (dB)	Desviación estándar
Tipo 1	20	8,1	2,9
Tipo 2	20	13,0	3,1
Tipo 3	20	20,9	2,1
Tipo 4	20	32,8	3,8
Vidrios	20	19,2	2,1
Metales	20	32,25	4,4

Fuente: Univ. Politécnica de Cataluña

#### *Tipos de obstáculos considerados:*

- **Tipo 1:** particiones dentro de aulas o laboratorios de tipo biombo o formando una pared completa. Este tipo de particiones se construye, habitualmente con materiales sintéticos o de madera y con un grosor de unos 2 ó 3 cm.
- **Tipo2:** paredes de separación entre distintas aulas adyacentes. El grosor de estos obstáculos es de unos 4 ó 5 cm. y suelen construirse con materiales sintéticos, madera o yeso.
- **Tipo 3:** paredes que separan aulas de pasillos y que delimitan zonas de servicio concretas. Los materiales de construcción son más obstructores que los anteriores, habitualmente yeso, ladrillo y baldosas. Su grosor oscila entre los 10 y 15 cm.
- **Tipo 4:** este tipo de obstáculos lo forman las paredes maestras que se encuentran en el módulo. Suelen estar hechas de ladrillo, cemento y yeso y su grosor está comprendido entre los 30 y 60 cm.
- **Vidrios:** en este conjunto de obstáculos se incluyen las ventanas y las puertas de vidrio que se pueden encontrar dentro del módulo.
- **Metales:** estos obstáculos son los que presentan una mayor obstrucción a las señales radioeléctricas. El ascensor y algunas puertas y estanterías metálicas son algunos de los obstáculos de este tipo que se encuentran en el módulo.

#### **Modelo de Pendiente Lineal**

El Modelo de Pendiente Lineal (LSM, *Linear Slope Model*) es el más sencillo de los presentados en el COST-231, dado a un único parámetro de ajuste. Este modelo asume

que la dependencia de las pérdidas de propagación con la distancia es de tipo lineal. La expresión que cuantifica las pérdidas medias viene dada por:

$$L = L_{bf} + \alpha d \quad (2.18)$$

donde  $\alpha$  es el parámetro o coeficiente dado en dB/m, que se ajusta de forma empírica a partir de un conjunto de medidas. A este modelo puede añadirse además, los efectos de los pisos y paredes con el fin de mejorar sus prestaciones.

Los valores óptimos para  $\alpha$  están entre 0.62, 2.8 y 0.22 para un piso, más pisos y entornos abiertos, respectivamente.

### **Modelos semi-deterministas**

En este tipo de modelos se puede considerar de forma más aproximada los efectos del entorno que en los modelos empíricos, permitiendo realizar un estudio más completo de las características del canal, ya que permiten predecir otros parámetros además de las pérdidas medias de propagación, tales como la respuesta del impulso, el ángulo de llegada de las distintas contribuciones y la estadística de la señal.

En el COST-231 se han discutido, especialmente, dos técnicas: Dominio de Tiempo de Diferencia Finito (FDTD, *Finite Difference Time Domine*) y las basadas en Óptica Geométrica (GO, *Geometric Optic*). Computacionalmente se ha demostrado que estas últimas son más eficientes que las FDTD.

Entre los métodos o procedimientos para obtener las distintas trayectorias de las contribuciones que alcanzan al receptor móvil, según la técnica GO, pueden citarse los métodos: *Aproximación de Imágenes (Image Approach Method)* y *Lanzado de Rayos (RLM, Ray Launching Model)*. La complejidad computacional de este último método se considera en [Huschka,1994].

#### **Método de las Imágenes**

Esta técnica de aproximación consiste en calcular las imágenes de cada estación con respecto a las paredes y suelos de mayor relevancia, usualmente los más cercanos y posteriormente considerar las trayectorias desde el AP hasta cada una de las imágenes. La respuesta total se obtiene con la suma coherente de todas las contribuciones, teniendo en cuenta el retardo en cada caso.

Este método no es eficiente cuando el entorno se complica y muy especialmente cuando se trata de considerar reflexiones de orden superior a dos. El efecto del mobiliario puede tenerse en cuenta añadiendo ciertas pérdidas adicionales.

### **Lanzado de Rayos (RLM)**

El método de trazado o lanzamiento de rayos consiste, justamente, en lanzar desde el transmisor un número finito, pero suficiente, de rayos de forma uniforme en las distintas direcciones del espacio. Para cada rayo lanzado, se consideran las múltiples reflexiones y transmisiones que sufre hasta alcanzar al receptor y se determina su intersección con una pared, dividiéndose el rayo incidente en un rayo penetrante y uno reflejado; luego cada uno de ellos se remonta a su intersección siguiente y así sucesivamente.

El número de reflexiones o transmisiones a considerar dependerá del nivel de señal a partir del cual una contribución dejará de ser significativa, o tras un número limitado de intercepciones con los obstáculos, es decir, el rayo deja de ser analizado cuando su amplitud cae por debajo de un umbral señalado, o se llega a un número máximo de interacciones rayo-pared según se especifique.

Para solucionar el problema de los objetos puntuales (receptores, elementos difractantes y dispersantes, etc.) se suele recurrir a una esfera de incertidumbre alrededor de ellos. El diámetro de tal esfera ha de ser dependiente de la distancia recorrida por los rayos y de la resolución angular con la que son lanzados. Puede considerarse una separación angular uniforme entre los rayos lanzados ( $\gamma$ ), y una superficie esférica alrededor del receptor, subdividida en poliedros geodésicos en forma de hexágonos, que se aproximan, además, en áreas circulares [Honcharenko, *et al*, 1992].

La figura 2.11 muestra una vista en dos dimensiones de la esfera en la zona de recepción, donde  $Rrs$  es su radio y  $d$  es la longitud de la trayectoria total entre el transmisor (Tx) y el receptor (Rx), dando lugar a la siguiente expresión:

$$Rrs = \gamma d / \sqrt{3} \quad (2.19)$$

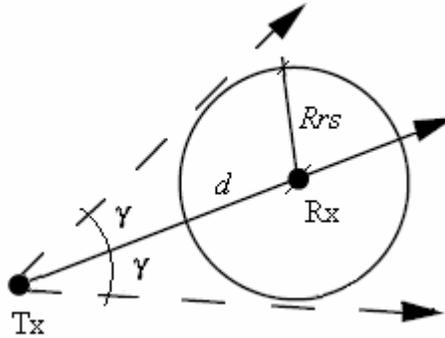


Figura 2. 22 Vista bidimensional de la esfera en el receptor.

Este método es muy útil en entornos muy complicados ya que permite un fácil seguimiento de las reflexiones. Pero sin embargo, resulta difícil la localización de los receptores dada la dificultad de saber si un rayo alcanza un objeto puntual o no, ya que el número de rayos lanzados, mayor o menor, siempre es finito.

### **Lanzado de Tubos**

Este modelo es una aproximación más exacta a la anterior para el caso de una simulación de la propagación tridimensional. En el COST-231 se considera una alternativa dentro del modelo RLM.

Para alcanzar una discretización completa del ángulo sólido manteniendo una determinación inequívoca y práctica en la recepción, puede ser subdividido en formas rectangulares, porciones incrementales del frente de onda esférico. Esto origina el envío de “tubos” de sección rectangular formada por cuatro rayos delimitadores y uno central que determina sus características electromagnéticas.

En este modelo ya no es necesario el uso de una esfera de incertidumbre para cada obstáculo o receptor puntual, ya que pueden considerarse alcanzados todos los puntos en el interior del tubo. Incluso, tras un cierto recorrido que haya degradado la resolución angular (los tubos se van abriendo), puede subdividirse cada tubo en otros cuatro más pequeños, lo que se conoce como método de “*splitting*”.

En  $y$  la dirección de propagación  $\vartheta_i$  y  $\psi_i$  del rayo central del tubo y sus correspondientes ángulos  $\Delta\vartheta_i$  y  $\Delta\psi_i$ , según se describe en la figura 2.12, están determinados por las ecuaciones (2.20) y (2.21), [Cichon, *et. al.*, 1995 y *et. al.*, 1996].

$$\Delta\Psi_i(\vartheta_i) = \frac{\Delta\vartheta}{\text{sen } \vartheta_i} \quad (2.20)$$

$$\vartheta_i = \frac{\Delta\vartheta}{2} + (i-1)\Delta\vartheta, \quad i = 1 \dots N_\vartheta \quad \text{y } \Delta\vartheta \text{ constante} \quad (2.21)$$

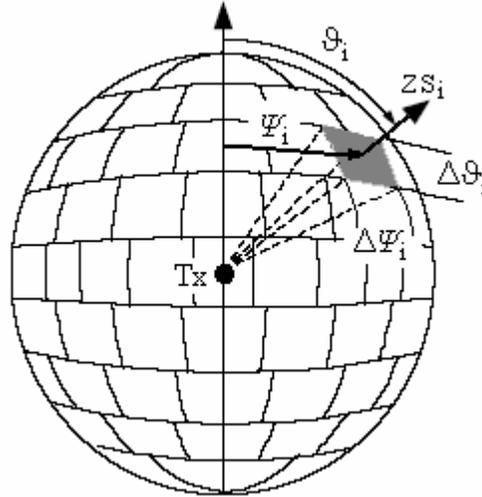


Figura 2. 23 Lanzado de tubos rectangulares.

Como puede inferirse, el principal problema en este modelo es la complejidad computacional del algoritmo, dado los 5 rayos por tubo, unido a la imposibilidad geométrica de dividir el espacio en tubos rectangulares de tamaño uniforme.

Se ha comprobado que este modelo no es muy útil cuando el entorno se complica mucho con puertas, ventanas y otras aberturas típicas. En cambio, tiene una mejor aplicación para lugares cerrados en los que el transmisor y el receptor comparten un mismo departamento.

### 2.2.3 Modelos de propagación para exteriores

El diseño y la puesta en práctica de los sistemas de comunicaciones inalámbricas requieren de una predicción de la propagación de la onda.

Las configuraciones de redes en células pequeñas (especialmente las micro y pico-células) resultan de mayor interés para los ambientes urbanos. Los criterios comúnmente usados para la definición de una micro-célula se relacionan con la altura del AP. Como un

caso típico, la altura de la antena de un punto de acceso está por debajo del nivel medio del tejado de las construcciones circundantes o a una altura casi igual, resultando, por lo general, una cobertura entre los 250 y 500 metros aproximadamente. Un AP de una pico-célula, generalmente está instalada dentro de un edificio, y proporciona cobertura además en las afuera y alrededor del mismo.

### ***Modelos bidimensionales para entornos urbanos***

Estos tipos de modelo permiten sólo pronosticar la cobertura radioeléctrica calculando las pérdidas básicas de propagación. Se hará referencia al modelo de Walfisch-Bertoni, que utiliza procedimientos deterministas para cuantificar la difracción múltiple sobre los tejados de edificios, y al de Walfisch-Ikegami, variante mejorada del anterior que incorpora correcciones empíricas y la posibilidad de considerar la antena transmisora por debajo de los edificios.

#### ***Modelo de Walfisch-Bertoni***

Joram Walfisch y Henri Bertoni (1988) presentaron un modelo físico del proceso de propagación que se produce en entornos urbanos no demasiado densos para frecuencias de UHF. Para ello, los bloques de edificios se consideran como cilindros difractantes que se comportan como filas de pantallas absorbentes.

Las hipótesis del modelo consideran, además, que la mayoría de las ciudades poseen un núcleo formado por edificios de gran tamaño, rodeado por un área mucho mayor en la que predominan otros edificios con alturas relativamente uniformes y están dispuestos en filas casi paralelas. En cada hilera, los edificios están adyacentes o separados un ancho menor al de los propios edificios. De aquí que el modelo funcione bien en zonas de calles paralelas y uniformes. Otra hipótesis del modelo consiste en considerar la altura de la antena transmisora por encima de la altura promedio de las edificaciones.

Evidentemente no es un método muy aplicable a entornos inalámbricos de redes de área local en un exterior típico. Sin embargo, puede ajustarse a condiciones reales y constituye una base para el siguiente modelo.

Suponiendo antenas isotrópicas, las pérdidas en espacio libre se calculan según la ecuación (2.6), o la (2.7a) específica para 2.4 GHz (dentro de la banda UHF).

Las pérdidas por propagación sobre los edificios se cuantifican a través de un factor  $Q(\alpha)$ , cuya expresión es:

$$Q(\alpha) = 0.1 \left( \frac{\alpha \sqrt{b/\lambda}}{0.03} \right)^{0.9} \quad (2.22)$$

donde  $b$  es el espacio medio de los edificios en el perfil que une al transmisor y al receptor,  $\lambda$  es la longitud de onda y  $\alpha$  se denomina ángulo de incidencia dado en radianes según la expresión:

$$\alpha = \frac{H}{R} - \frac{R}{2R_e} \quad (2.23)$$

donde  $H$  es la altura de la antena transmisora sobre la altura media de los edificios,  $R$  es la distancia entre el transmisor y el edificio inmediatamente anterior al receptor inalámbrico en kilómetros, y  $R_e$  el radio efectivo de la Tierra ( $8.5 \cdot 10^3$  Km).

Las pérdidas asociadas al proceso de difracción dependen de la forma y construcción de los edificios en el entorno del receptor. Una aproximación simple para este proceso cuando la antena receptora está cerca del suelo se obtiene cuando se asume que una hilera de edificios actúa como un semiplano absorbente situado en el centro de la fila. Para este caso la amplitud del campo eléctrico entorno al receptor se obtiene multiplicando el nivel de campo en el tejado por el factor  $\beta$ :

$$\beta = \frac{\sqrt{\lambda}}{2\pi [(b/2)^2 + (h_{edif} - h_m)^2]^{1/4}} \left( \frac{1}{\gamma - \alpha} - \frac{1}{2\pi + \gamma - \alpha} \right) \quad (2.24)$$

donde  $h_{edif}$  es la altura media de los edificios y  $h_m$  la altura de la antena receptora, ambas en metros, y  $\gamma$  según la ecuación:

$$\gamma = \tan^{-1} \left( \frac{2h_{edif} - 2h_m}{b} \right) \quad (2.25)$$

En ocasiones el término  $1/(2\pi + \gamma - \alpha)$  se desprecia frente a  $1/(\gamma - \alpha)$  y se asume además que  $\alpha$  es pequeña comparado con  $\gamma$  pero estas aproximaciones nos alejan de un entorno real.

Este modelo se considera bidimensional ya que estudia en perfil que une al transmisor con el receptor. Sin embargo, para tratar de cuantificar las contribuciones multitrayecto, se considera que el valor cuadrático medio del campo total es mayor que el producido por la contribución principal en un factor  $\sqrt{2}$ , dado que las contribuciones secundarias tienen una amplitud comparable a la principal pero con fase aleatoria.

Combinando las expresiones anteriores y el factor  $\sqrt{2}$  se obtiene, para 2.4 GHz, la reducción en dB que experimenta el campo con respecto al que resultaría para las mismas antenas separadas por una distancia  $d$  en espacio libre:

$$L_{ex} = A + 111.48 + 18 \log d(\text{m}) - 18 \log H(\text{m}) - 18 \log \left(1 - \frac{d^2}{17H}\right) \quad (2.26)$$

donde el último término tiene en cuenta la curvatura de la Tierra y el término  $A$  la influencia de la geometría de los edificios:

$$A = 5 \log \left[ \left( \frac{b}{2} \right)^2 + (h_{edif} - h_m)^2 \right] - 9 \log b + 20 \log \left\{ \tan^{-1} \left[ \frac{2(h_{edif} - h_m)}{b} \right] \right\} \quad (2.27)$$

Las pérdidas totales  $L_p$  se obtienen sumando  $L_{ex}$  a las pérdidas en condiciones de espacio libre  $L_{bf}$  para antenas isotrópicas:

$$L_p = L_{bf} + L_{ex} \quad (2.28)$$

De la exposición previa se deduce que este modelo es aplicable a entornos urbanos en los que no existe una visibilidad directa entre el transmisor y el receptor. Los edificios tienen una organización más o menos perpendicular a la dirección de propagación y para un margen de frecuencias entre de 300 MHz a 3 GHz para una distancia de enlace entre 200 metros y 5 Km.

### **Modelo de Walfish-Ikegami**

Se ha seleccionado este modelo por ser uno de los más actuales. El mismo es propuesto por el grupo de trabajo del proyecto europeo COST-231 y está basado en otros dos, el Ikegami-Ioshida y el anteriormente detallado Walfish-Bertoni, ahora con orientación de las

calles, transmisión por debajo de los edificios, tipo de ciudad, márgenes de distancias al transmisor y aplicable en situaciones de propagación LOS y NLOS.

En la figura 2.13 se representan los parámetros directamente vinculados con un entorno típico.

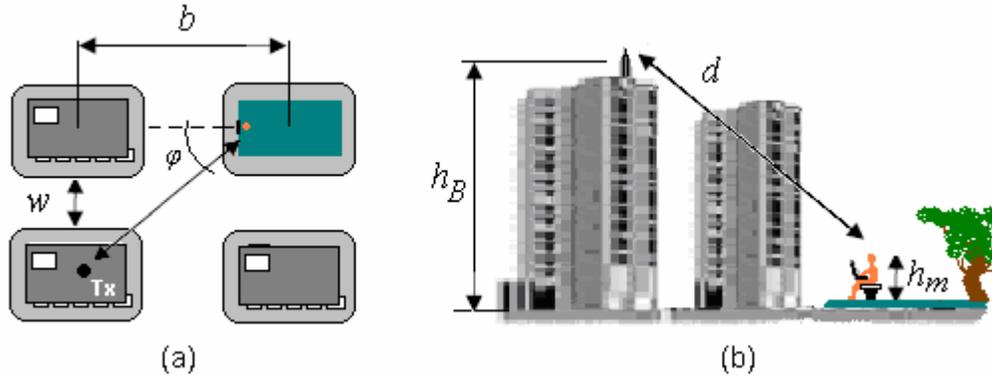


Figura 2.24 Pasaje visual común para el método Walfish-Ikegami, (a) vista superior, (b) vista lateral

Para las condiciones LOS y NLOS se define:

$$\text{LOS: } L_{bf} = 42.6 + 20 \log f \text{ (GHz)} + 26 \log d \text{ (m)} \tag{2.29}$$

$$\text{NLOS: } L_b = \begin{cases} L_{bf} + L_{rts} + L_{msd}, & L_{rts} + L_{msd} > 0 \\ L_{bf}, & L_{rts} + L_{msd} < 0 \end{cases} \tag{2.30}$$

donde  $L_{rts}$  es la pérdida debida a la difracción del conjunto “terrace-calle” entre los edificios y el cliente inalámbrico y se calcula a través de la ecuación:

$$L_{rts} = -16.9 - 10 \log w + 10 \log f + 20 \log(\Delta h_{edif}) + L_{ori} \tag{2.31}$$

donde  $\Delta h_{edif}$  es la altura media de los edificios sobre la altura de la antena del receptor móvil ( $h_{edif} - h_m$ ) en metros. Si  $L_{rts} \leq 0$ , se toma  $L_{rts} = 0$ . El término  $L_{ori}$  comprende el ángulo  $\phi$  entre el rayo y el eje de la calle:

$$L_{\text{cor}} = \begin{cases} -10 + 0.354 \varphi, & 0 < \varphi < 35^\circ \\ 2.5 + 0.075 (\varphi - 35^\circ), & 35 \leq \varphi < 55^\circ \\ 4 - 0.114 (\varphi - 55^\circ), & 55 \leq \varphi \leq 90^\circ \end{cases} \quad (2.32)$$

$L_{\text{msd}}$  es una estimación de la “difracción multiobstáculo” que experimenta el rayo entre la antena transmisora y el edificio próximo al receptor, debida a los edificios interpuestos entre ambos:

$$L_{\text{msd}} = L_{\text{bsh}} + k_a + k_d \log d + k_f \log f - 9 \log b \quad (2.33)$$

Cuyos parámetros vienen dados por las siguientes expresiones:

$$L_{\text{bsh}} = \begin{cases} -18 \log(1 + \Delta h_B), & \Delta h_B > 0 \\ 0, & \Delta h_B < 0 \end{cases} \quad (2.34)$$

$$k_a = \begin{cases} 54 & \Delta h_B \geq 0 \\ 54 - 0.8 \Delta h_B & \Delta h_B < 0 \text{ y } d \geq 0.5 \\ 54 - 0.8 \Delta h_B d / 0.5 & \Delta h_B < 0 \text{ y } d < 0.5 \end{cases} \quad (2.35)$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & \Delta h_B \geq 0 \\ 18 - 15 \Delta h_B / h_{\text{edif}} & \Delta h_B < 0 \end{cases} \quad (2.36)$$

$$k_f = \begin{cases} 0.7 (f / 925 - 1) & \left\{ \begin{array}{l} \text{para ciudades de tamaño medio y} \\ \text{zonas suburbanas con densidad} \\ \text{de vegetación moderada} \end{array} \right. \\ 1.5 (f / 925 - 1) & \left\{ \begin{array}{l} \text{para grandes zonas metropolitanas} \end{array} \right. \end{cases} \quad (2.37)$$

El modelo inicial sólo es aplicable para un rango de frecuencia entre los 800 y 2000 MHz. Sin embargo, se han desarrollado diversos estudios sobre el tema logrando ligeras modificaciones al método original, ajustable entonces a frecuencias ligeramente mayores a los 2 GHz. Es aplicable para una altura del punto de acceso entre cuatro y 50 metros y

entre uno y 50 metros para el usuario inalámbrico. La distancia del enlace deberá estar entre 20 metros y cinco kilómetros.

### Otros modelos aplicables

Dentro de los modelos estudiados en interiores, los de simple y doble pendiente y el de log-distancia, son aplicables a entornos de exteriores no muy complejos.

Típicamente puede hacerse uso de ellos para modelar el entorno en parqueos, parques, otras zonas abiertas en exteriores y no cargada de un gran número de obstáculos, etc. Los parámetros de estos métodos son, por lo general, ajustados a las condiciones específicas de cada zona considerada.

En la amplia industria de la ingeniería de software, se encuentran múltiples programas computarizados destinados a calcular las pérdidas por propagación en diferentes entornos según sean definidos por el usuario. *WinProp* (incluyendo *WallMam*, *ProMan* y *AMan*) es un ejemplo típico para tales fines. En la figura 2.14 se muestra un ejemplo obtenido a partir de una estructura prediseñada.

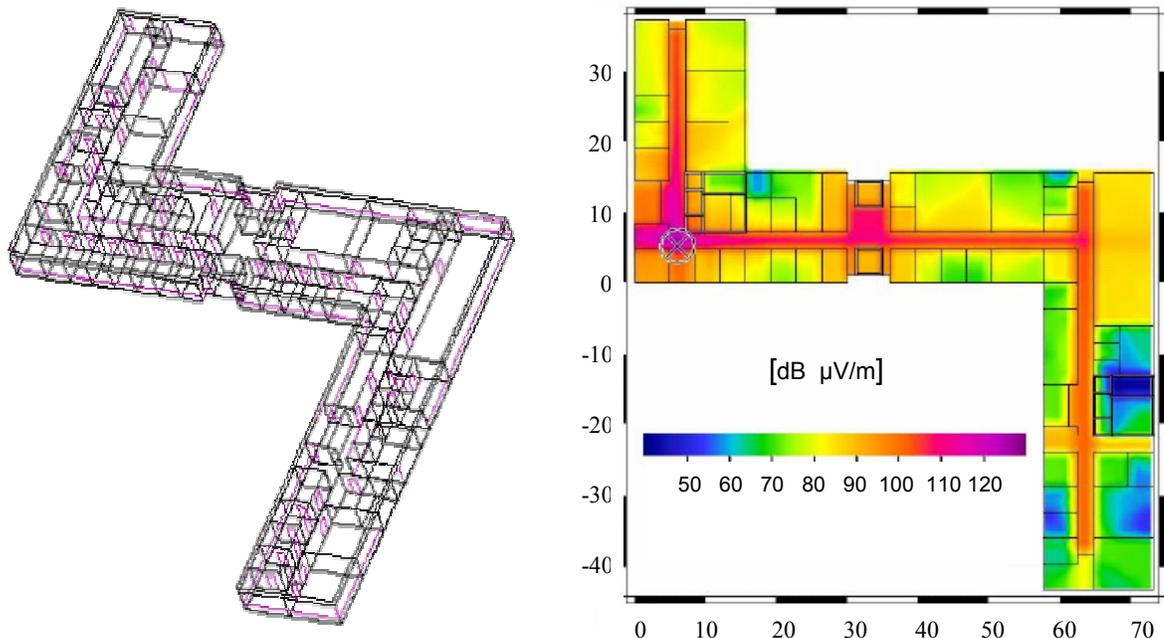


Figura 2.25 Ejemplo simulado a 2.4 GHz con una potencia de transmisión de 0.1W en ambiente *ProMan*.

# Capítulo 3



## Capítulo 3

### **Análisis de Cobertura en Redes WLAN**

En este capítulo se ofrece una información más detallada a cerca de los parámetros y consideraciones a tener en cuenta en el diseño y montaje de una red WLAN. Los procedimientos a seguir están sujetos a un orden lógico con el objetivo de convertir este trabajo de diploma en una herramienta útil a considerar durante la planificación de una red inalámbrica de servicio local.

#### **3.1 Cobertura teórica**

Para las comunicaciones móviles, de forma general, la cobertura es un tema relevante y con características muy peculiares relacionadas con el contexto al que es referido dentro de las radiocomunicaciones. A causa de las múltiples formas de trayecto radioeléctrico y la diversidad de entornos, este término está referido únicamente a una predicción estadística.

La característica de movilidad de un terminal es una función del grado de cobertura de la red. Dado un punto de acceso, generalmente puede aplicarse una cobertura necesaria para lograr un enlace en el sentido AP-estación suficientemente grande. Sin embargo, el “retroalcance” o alcance de cobertura en sentido contrario, estación-AP, es con frecuencia más pequeño, por lo que puede darse el caso que el terminal inalámbrico móvil escuche a su AP correspondiente y en cambio este último no escuche la respuesta de aquel. Esta distinción limita el grado de movilidad de los terminales y a la vez la *calidad de cobertura* de la red.

La calidad estadística de cobertura se evalúa de acuerdo con el *porcentaje de emplazamientos* y *de tiempo*, donde con el primero se indican los porcentos de lugares comprendidos en la zona de cobertura teórica en la que debiera establecerse un enlace, y con el segundo se especifica el tiempo que se espera la existencia del mismo, respectivamente.

Dentro del porcentaje de emplazamientos se comprenden dos criterios de calidad, un primero referido al área que circunda al punto de acceso (*calidad de cobertura zonal*) y

otro relacionado con la zona anular situada en el límite de la cobertura teórica (*calidad cobertura perimetral*).

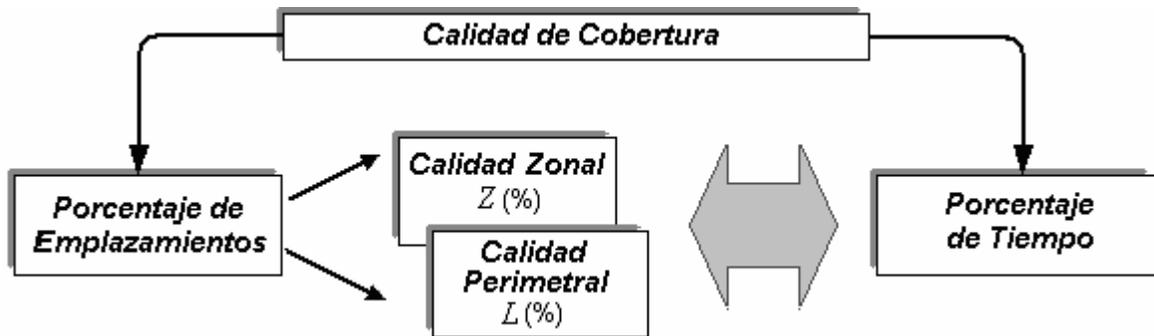


Figura 3.1 Evaluación estadística de cobertura.

Como puede inferirse en la figura 3.1, la calidad perimetral ( $L$ ) y zonal ( $Z$ ) están dadas para un porcentaje de tiempo determinado.

Supongamos, por ejemplo, que la cobertura omnidireccional de un AP en una red WLAN que determina un radio de acción aproximado de 100 m, está condicionado a un 85% de calidad de cobertura perimetral para un 90% de tiempo, lo que expresa que en este porcentaje del tiempo total analizado existe conexión en el 85% del área correspondiente a un anillo situado sobre la circunferencia de 100 m de radio (Fig. 3.2).

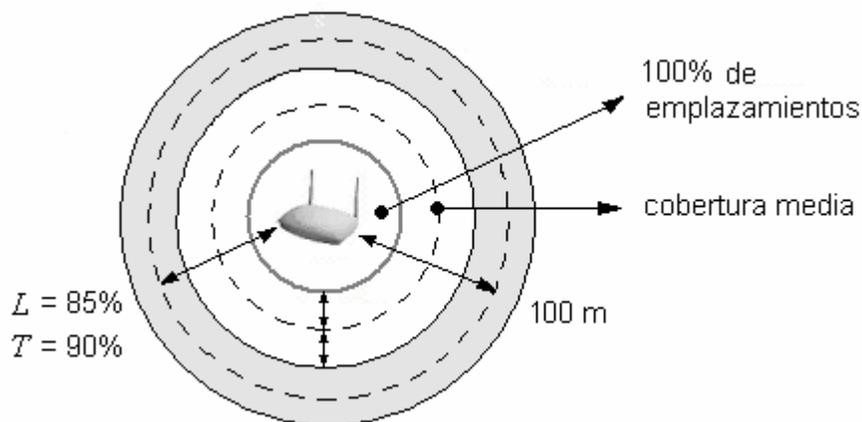


Figura 3.2 Ejemplo de cobertura omnidireccional.

La calidad de cobertura perimetral está referida a los puntos alejados del centro transmisor por lo que corresponde a un caso desfavorable. Como puede verse en la figura 3.2, en las proximidades del punto de acceso el porcentaje de emplazamientos se

eleva prácticamente al 100% y entre este y el valor de cobertura perimetral se encuentra la cobertura media para toda la zona. Los datos de emplazamientos y tiempo debieran ser especificados durante el montaje de un sistema inalámbrico, cuyos valores intervienen directamente en el diseño y la planificación de estas redes. No obstante, con frecuencia, análisis como estos son obviados y los diseñadores solo tienden a considerar aspectos técnicos en sus proyectos. Esto puede traer como consecuencia extender el área de cobertura a zonas no deseadas trayendo consigo problemas de seguridad antes mencionados, o por el contrario, no cubrir zonas planificadas.

## **3.2 Proyecto de diseño**

La realización de un proyecto para el montaje de una red WLAN, comprende el análisis de una gran variedad de parámetros y pasos a tener en cuenta para lograr un diseño correcto (Fig. 3.3).

El cálculo de cobertura radioeléctrica permite la obtención de las características de potencia y radiación del equipamiento técnico, para lo que se requiere el grado de calidad de cobertura deseado.

Varias organizaciones comienzan con un acercamiento experimental donde, primeramente, se comienza con una cobertura primaria a pocas áreas comunes tales como pasillo, salas de conferencias, etc. Esta estrategia se utiliza para tener una mejor conciencia del tamaño de la inversión y para conseguir una mejor comprensión de las exigencias del consumidor. Además, producto al constante desarrollo de la tecnología inalámbrica, existe un miedo justificado a la obsolescencia de los equipos. Una vez que la primera etapa de diseño experimental se torne segura, se comienza el despliegue a una escala mayor según las necesidades.

### **3.2.1 Parámetros globales**

En situaciones comunes, existen varias consideraciones a tener presente cuando se diseña una red inalámbrica. La señal, por lo general, experimenta grandes variaciones en sus niveles de potencia dadas por las paredes y objetos, incluso, por el movimiento de las personas en el área de cobertura. De aquí la necesidad de un profundo análisis de la zona a considerar y las características más peculiares del entorno.

Ya se ha abordado lo importante que es realizar un estudio del uso del espectro en el área y sus alrededores y las posibles interferencias dado el equipamiento técnico del lugar.

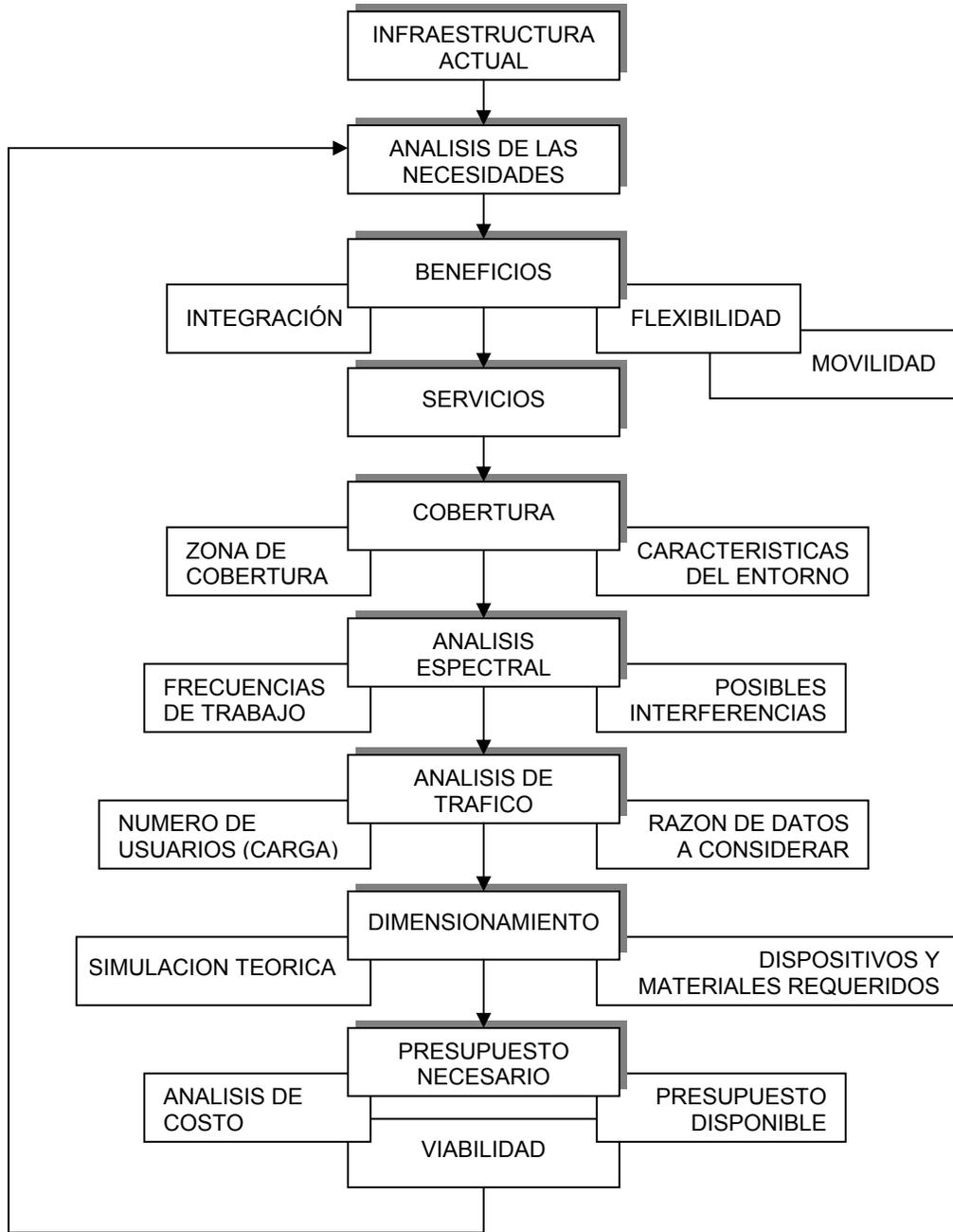


Figura 3.3 Pasos para la confección de un proyecto de diseño.

Puesto que el acoplamiento inalámbrico tiene una capacidad limitada, es útil lograr un compromiso entre área de cobertura y cantidad de usuarios a partir de los servicios que

serán proporcionados. Debe además garantizarse una carga balanceada, ya que evidentemente un ancho de banda garantizado por dos o más AP, cubriendo la misma área, pueden proporcionar un desenvolvimiento más eficiente de acuerdo al número de usuarios que soliciten los servicios.

### ***Localización***

El AP debe ser ubicado dentro de la zona de interés y su punto exacto está condicionado por las particularidades del entorno. Para interiores pueden considerarse el centro de una habitación u oficina, en el centro de un pasillo o en intersecciones de dos o más pasillos, etc. En exteriores su ubicación es relativamente más sencilla aunque debe tenerse un mayor control de la zona de cobertura por los problemas de seguridad anteriormente tratados.

El dispositivo de acceso debe ponerse como mínimo a unos 1.5 metros sobre el suelo, especialmente en un claro del lugar o a una altura relativamente mayor que la promedio entre los obstáculos aledaños.

### ***Potencia de señal***

La mayoría de los puntos de acceso controlan el área efectiva que pueden cubrir variando el nivel de potencia de transmisión, en dependencia de su sensibilidad de recepción. Para lograr un aumento de cobertura, puede emplearse el nivel más alto de energía, lo que se traduce como un tamaño de célula mayor, y consecuentemente, un número menor de AP requeridos para cubrir una zona determinada. La cobertura de una célula pequeña, sin embargo, se alcanza mejor con un nivel más bajo de potencia lo que reduce las posibles interferencias con las células vecinas.

### ***Antena***

Independiente de otros parámetros como potencia, carga y canal, las características de cobertura de un punto de acceso requieren ser moldeadas por el uso de una antena externa. Un punto de acceso equipado con una antena omnidireccional puede no ser la mejor opción para todos los casos ya que, por ejemplo, un vestíbulo o un pasillo puede ser eficientemente cubierto con una antena bidireccional con un ancho del lóbulo más estrecho.

### ***Pérdidas Mínimas***

Las pérdidas son más bajas y el desempeño del sistema es mejor mientras más cortas sean las distancias entre las entidades y menor sea el número de obstáculos a superar. De igual forma lograr una ubicación en un lugar despejado determina una condición LOS más favorable.

### ***Movilidad o Roaming***

Cuando cualquier área está dentro de un rango de recepción determinado por más de un punto de acceso, las células de cobertura se encuentran regularmente solapadas. Cada estación inalámbrica establece, automáticamente, la mejor conexión posible con uno de los puntos de acceso. Las zonas solapadas constituyen una cualidad importante en el montaje de una red WLAN, ya que se incorporan propiedades *roaming* a la cobertura permitiéndoles a los usuarios móviles una mayor libertad dentro de dichas celdas solapadas sin perder la conexión de red.

### ***Carga Balanceada***

Las zonas congestionadas con muchos usuarios y una densidad de tráfico elevada requieren una estructura multicelular donde varios AP co-localizados “iluminan” sus respectivas áreas dando origen a una zona de cobertura común con un incremento en la eficiencia y desempeño de la red. Las estaciones son equitativamente repartidas entre los AP manteniendo un balance de carga adecuado. Esta es una opción brindada por algunos productos inalámbricos para las redes WLAN entre los que puede citarse la serie *BreezeNET PRO.11*, desarrollada por Ericsson.

### ***Canales***

Al distribuir más de un punto de acceso en una misma zona, debe considerarse la planificación de canales y la distancia de reutilización entre los AP con el objetivo de evitar interferencias.

Considérese como ejemplo la situación representada en la figura 3.4 donde se muestran cuatro AP regidos por la norma IEEE 802.11b. Como se explica en el primer capítulo, solo tres puntos de accesos con este estándar pueden compartir una misma zona sin riesgos a interferencias entre ellos a partir de los tres canales no solapados.

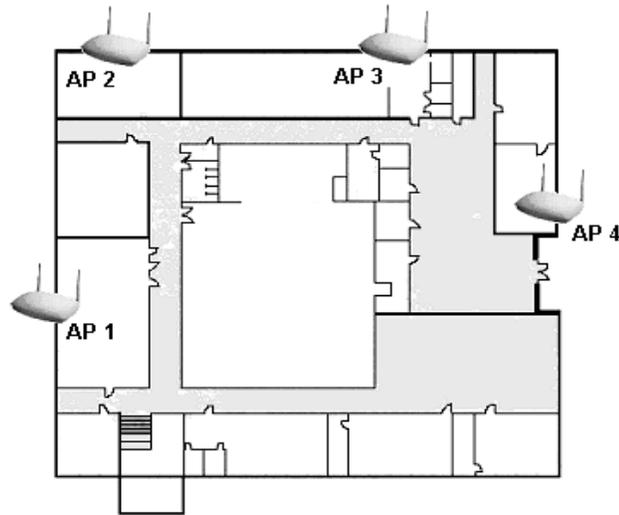


Figura 3.4 Posible distribución de 4 AP en un entorno interior típico.

Una posible combinación puede ser que los puntos uno, dos y tres operen en canales diferentes y el cuarto utilice el canal empleado por el primero. Esta reutilización de canales entre los AP uno y cuatro no deberá provocar interferencias, dado que están lo suficientemente alejados. Pudiera temerse que las señales atravesaran la pared y alcanzara el radio de acción de AP opuesto, sin embargo, considerando la distancia y los obstáculos entre ellos esta interferencia alcanzaría niveles insignificantes.

### ***Rendimiento o Throughput***

Retomando la figura anterior puede inferirse que el ancho de banda total disponible asciende a 44 Mbps. Esto pudiera ser suficiente para, aproximadamente, 50 usuarios si son distribuidos equitativamente por toda zona de cobertura administrada por los cuatro AP, resultando un ancho de banda por usuario aceptable.

En caso de ser necesario adicionar otros puntos de acceso para lograr un mayor equilibrio de cargas y mejor desempeño, puede ajustarse la potencia de salida de estos, resultando células más pequeñas y con menores riesgos de interferencia. Cabe considerar la posibilidad de cubrir solo una habitación por AP.

Es también resulta importante ajustar la energía en el NIC de la estación móvil para evitar posibles interferencias con otras unidades.

Un AP sobrecargado puede redireccionar a un usuario hacia otro AP disponible dentro de un área de cobertura con una menor carga de tráfico.

### 3.2.2 Planeamiento de capacidad y cobertura

Una vez que las áreas de la cobertura y los parámetros anteriores sean definidos, se procede a determinar los requisitos del ancho de banda de cada área.

En una red inalámbrica el número de usuarios en cada dominio de colisión puede cambiar y el ancho de banda mismo varía en dependencia de las características temporales de interferencia de los alrededores. A estas informaciones se incorporan, fundamentalmente, del análisis de tráfico y de carga, basándose en la densidad de usuarios y sus requisitos individuales, en dependencia además, de los servicios que se brinden, los tipos de información a solicitar, y por supuesto, de las características de la empresa, asociación o del lugar.

De acuerdo con un cálculo aproximado del ancho de banda por usuario y el número total de usuarios en cada local, se determina el área de cobertura, pretendiéndose, generalmente, lograr una uniformidad en toda la zona de interés. Un área grande con una distribución no uniforme de usuario se divide en subzonas, de tal forma que cada una de ellas tenga una distribución uniforme de usuario, o pueda ser cubierta con un solo punto de acceso. El número de los puntos de accesos necesarios para apoyar la carga ( $N_{AP}$  de capacidad) de una zona dada se determina usando la ecuación siguiente:

$$N_{AP(\text{capacidad})} = \frac{B_w N T(\%)}{\eta(\%) R_a} \quad (3.1)$$

donde  $B_w$  es el ancho de banda requerido por usuario,  $N$  es el número total de usuarios en el área,  $T$  es el porcentaje de tiempo en el que el usuario está activo y  $\eta$  es la eficiencia del canal, definida como la relación de la razón real sobre la razón de dato asociada  $R_a$ .

Un diseñador de red tiene la posibilidad de escoger entre las diferentes normas y tecnologías inalámbricas existentes en el mercado. Esta opción está en dependencia del ancho de banda que se desea poner a disposición los usuarios. Una estrategia típica, por ejemplo, es utilizar el estándar 802.11b para proporcionar mayor cobertura y 802.11a para mayor capacidad (Fig. 3.5). El estándar 802.11g proporciona un punto intermedio, una capacidad próxima al 802.11a y una cobertura cercana al 802.11b. Sin embargo, este estándar, al igual que el 11b, limita en 3 el número de canales no solapados.

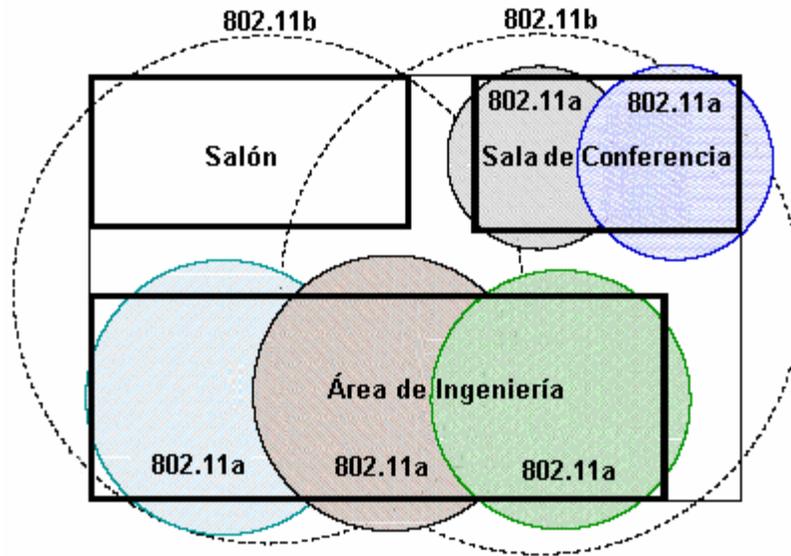


Figura 3.5 Uso de las normas 802.11 a y b.

Existe una relación entre la razón de datos asociada y la distancia, pues mientras menor sea la primera mayor será el radio de cobertura (Fig. 3.6).

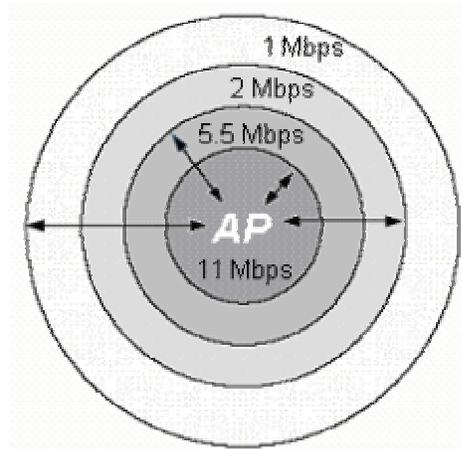


Figura 3. 6 Relación entre razón de datos y distancia para el estándar 802.11b.

La razón de datos  $R_a$  se elige basándose en los requerimientos de capacidad de la zona, donde para las regiones de alta demanda, tales como áreas de ingeniería y salas de conferencias, se utiliza una razón mínima de asociación lo más cercana a la capacidad máxima de canal, por ejemplo, pudiera considerarse 5.5 Mbps para 802.11b y 36 Mbps

para las redes 802.11a/g. Para las regiones con bajos requerimientos, por ejemplo los pasillos y salones, se elige un valor más pequeño para la razón de datos mínima.

El paso siguiente es determinar el número y la colocación de los puntos de acceso para asegurar la cobertura. Si es necesario un pequeño ancho de banda para una zona de cobertura extensa, entonces el número de AP calculados en el planeamiento de cobertura es más grande que el obtenido en el planeamiento de capacidad. Para las áreas con altos requerimientos de ancho de banda, se invierte la situación. El número de los puntos de acceso requeridos para la cobertura ( $N_{AP}$  de cobertura) es estimado por la ecuación simple siguiente:

$$N_{AP(\text{cobertura})} = \frac{C_T}{C_{AP}} \quad (3.2)$$

donde  $C_T$  es el área total a cubrir y  $C_{AP}$  es la cobertura de un solo AP según su potencia máxima de transmisión.

### 3.2.3 Posición de los AP y selección de potencia

Son varios los factores a considerar para predecir el área de cobertura en cualquier entorno de un AP en particular (disposición del edificio, materiales de construcción, y obstáculos del RF). Sin el uso de herramientas sofisticadas de software, este paso requiere considerablemente del conocimiento a cerca de la propagación de onda, la experiencia e intuición en el diseño inalámbrico.

El número inicial de AP usados para cubrir un área es el máximo obtenido a partir de la etapa de planeamiento de capacidad y cobertura. De acuerdo con las características de absorción de diversos materiales, el rango y la cobertura de los AP y los dispositivos del cliente, se hace una estimación de cobertura de la señal para los diferentes puntos de acceso. Toda esta información se utiliza como modelo para poner puntos de acceso en cada área de la cobertura. Otra estrategia típica es repartir los AP en toda la zona de cobertura seccionada tipo rejillas.

Inicialmente el nivel de la energía se fija al máximo posible y se agregan más puntos de acceso en caso de detectar agujeros de la cobertura. Luego, los niveles de potencia de los AP se reducen si hay demasiado solapamiento entre las células adyacentes. No obstante, como ya se explicó, en ocasiones se considera un por ciento de solapamiento

determinado para mantener y asegurar una cobertura continua a los clientes, considerado en el 30% aproximadamente.

### 3.2.4 Asignación de canal

Una vez que se obtengan las localizaciones provisionales de los puntos de acceso, se procede a la asignación de los canales, con el objetivo de reducir los niveles de interferencias entre las células adyacentes o relativamente próximas entre sí.

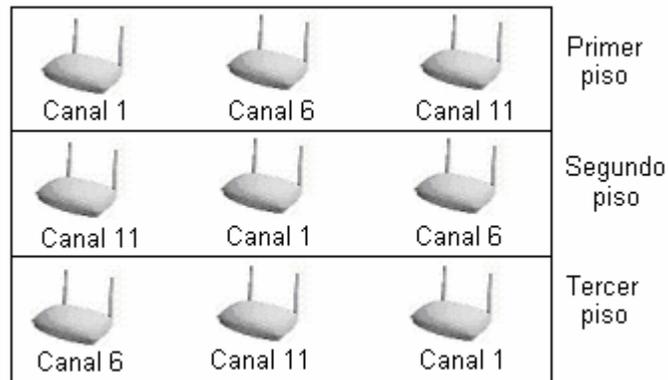


Figura 3.7 Distribución típica de canales DSSS para el estándar 802.11b.

Una estrategia típica es utilizar la disposición del canal de secuencia directa tal como muestra en la figura 3.7. El número de canales disponibles, sin interferencias, depende de la tecnología que se emplee.

## 3.3 Modelo de cobertura

Dentro del montaje de una red WLAN, conjuntamente con las consideraciones de todos los parámetros anteriormente abordados, se lleva a cabo un profundo análisis de las atenuaciones características del entorno referida a puntos o a zonas estratégicas.

Uno de los modelos más empleados en la predicción de cobertura para las redes LAN inalámbricas es el log-distancia, abordado con anterioridad, dado que este se ajusta con facilidad a diferentes entornos con sólo variar el exponente de atenuación. Primeramente considérense los aspectos de pérdidas despreciando el término dependiente de la desviación:

$$L_{LPLM} = L_o(d_o) + 10n \log(d/d_o) \quad (3.1)$$

A partir de la ecuación de Friis (2.11), referida en el capítulo 2, se sustituye el término de pérdidas por la expresión (3.1) obteniéndose:

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_{LPLM} \quad [\text{dBm}] \quad (3.2)$$

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_{bf}(d_o) - 10n \log(d/d_o) \quad [\text{dBm}] \quad (3.3)$$

donde  $d_o$  se refiere por lo general a un metro y  $n$  se escoge a conveniencia de acuerdo al entorno y a partir de los valores especificados. En el anterior capítulo se ha puesto a disposición algunos de estos valores a las frecuencias de interés para las redes WLAN.

Considérese, por ejemplo, un AP con una potencia de radiación  $P_t = 18$  dBm (63 mW aproximadamente), en la norma IEEE 802.11b (2.4 GHz) y una Laptop que puede estar situada indistintamente dentro de una habitación en condiciones LOS y NLOS.

Asumiendo para la frecuencia de 2.4 GHz los valores de pendiente 1.9 y 3.7 para las condiciones definidas y 4 para un entorno NLOS pesimista, podemos arribar a las siguientes situaciones a partir de la ecuación (3.3):

$$P_r = 18 + G_t + G_r - 40 - 10n \log(d) \quad [\text{dBm}] \quad (3.4)$$

Los valores de ganancias pueden ser obtenidos considerando los datos técnicos que proporcionan los diferentes dispositivos empleados en el diseño y montaje de la red inalámbrica. En ocasiones no se dispone de estos valores y no se considera para tales casos, un desacierto si se toma sus valores unitarios:

$$P_r = -22 - 10n \log(d) \quad [\text{dBm}] \quad (3.5)$$

Sustituyendo en (3.5) el exponente  $n$  por sus respectivos valores de acuerdo a las condiciones del entorno obtenemos a  $P_r$  (dBm) en función de la distancia.

**LOS:**  $P_r = -22 - 10(1.9) \log(d) = -22 - 19 \log(d)$

**NLOS:**  $P_r = -22 - 10(3.7) \log(d) = -22 - 37 \log(d)$

**NLOS Pesimista:**  $P_r = -22 - 10(4) \log(d) = -22 - 40 \log(d)$

En el Anexo III se muestra la correspondiente simulación en *MatLab* de los resultados Este procedimiento, a pesar de predecir de forma aproximada la cobertura de un AP, se aleja ligeramente de los resultados más reales. Evidentemente, lo ideal es considerar directamente los datos comerciales que proporcionan los diferentes equipos que se emplean en el diseño de la red inalámbrica.

En la figura 3.8, se muestra un diagrama de radiación de un AP *Siemens* (Dato Técnico para Puntos de Acceso *I-GATE 11M I/LAN*), normado por el estándar IEEE 802.11b a una razón de datos de 11 Mbps.

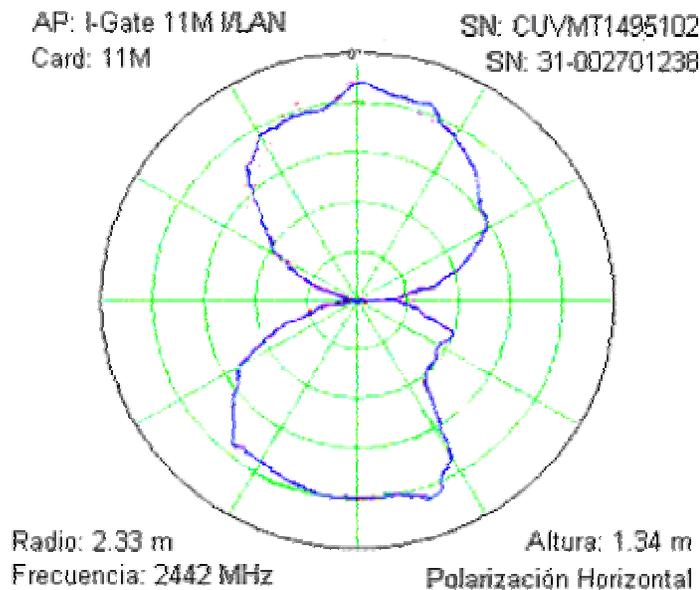


Figura 3. 8 Diagrama de radiación para un AP 802.11b.

A partir de este diagrama de radiación y los datos técnicos que se especifican para este modelo de AP, tenemos que consta de un alcance máximo aproximado de 60 metros con una potencia de transmisión de 18 dBm y una razón de error de bit (BER, *Bit Error Rate*) de  $1 \cdot 10^{-5}$ . Además, a la distancia de 2.33 m la fuerza de señal recibida desde el dispositivo de acceso es -42.4 dBm por lo que estos valores pueden ser tomados como referencia.

La ventaja de usar el punto de referencia tomado a partir de los datos técnicos, es que las ganancias de las antenas están implícitas en esta medición.

Otra especificación a considerar es la tolerancia de potencia del elemento receptor (NIC o adaptador externo). Por ejemplo, se puede asumir que para el extremo receptor se tolerará como mínimo una potencia de señal de -76 dBm, la cual puede ser considerada en los 60 metros, rango máximo especificado por *Siemens* para el AP.

A partir de los datos anteriormente proporcionados puede hacerse un ajuste de pendiente logrando una aproximación mejor para el cálculo de cobertura. Ahora los valores exponenciales son más reales pues, a parte de estar considerados para una frecuencia específica y un entorno determinado, se corresponden con las características del equipamiento técnico empleado en el montaje inalámbrico de la red.

La realización de estos cálculos y predicciones suele ser auxiliado por múltiples *software's* encaminados a estos fines. *PRISM 802.11 Wireless* es un ejemplo de aplicación con tales intereses y está destinado a brindar una información cualitativa a través de las mediciones del porcentaje de la potencia de señal y de la calidad del enlace. La relación entre porcentaje y dBm no se define con exactitud pues esta depende del tipo de NIC o adaptador, de la versión de los *driver's* y demás soportes empleados. Estos valores porcentuales se indican solamente para estimar, de forma aproximada, la calidad del radio-enlace o para optimizar la colocación de las estaciones en el entorno.

# *Conclusiones*



## **CONCLUSIONES**

Los siguientes puntos reflejan de forma precisa el cumplimiento de los objetivos trazados:

- Se han especificado los principales estándares y características de una red inalámbrica, que va desde sus elementos y definiciones afines hasta las diferentes propiedades y aplicaciones.
- Se han expuesto múltiples métodos de predicción de propagación, muy empleados en la actualidad para definir la cobertura en estos tipos de redes.
- Se propone un procedimiento lógico para el diseño y dimensionamiento de una red inalámbrica a partir de parámetros bien definidos.
- Se brinda un método práctico para el cálculo de un enlace empleando tecnología *BreezeNET*.

# Recomendaciones



## **RECOMENDACIONES**

De acuerdo con la investigación llevada a cabo se proponen las siguientes recomendaciones:

- Incluir en el programa de estudio de la asignatura Sistema de Radiocomunicaciones los diferentes métodos propuestos con el objetivo de enriquecerla con las actuales tendencias de la tecnología inalámbrica.
- Implementar un software destinado a la predicción de cobertura aplicable al tema, con lo que se lograría incorporar a la asignatura referida sesiones de laboratorios de simulación virtual.
- Valorar la posibilidad de implementar una red inalámbrica en una zona de interés de la Universidad a partir de los modelos de propagación y métodos de predicción de cobertura propuestos.

# *Bibliografía*



## Bibliografía

1. Anderson, CH. R. (2002). *Design and implementation of an ultrabroadband millimetre-wavelength vector sliding correlator channel sounder and in-building multipath measurements at 2.5 & 60 GHz*, Trabajo de Diploma, Instituto Politécnico de Virginia, EUA.
2. Blaw, John (2002). "Wi-Fi hotspot networks sprout like mushrooms", *IEEE Spectrum*, **39**(9): 18-20.
3. Borisov Nikita, Ian Goldberg y David Wagner (2001). "Intercepting mobile communications: The insecurity of 802.11", Universidad de Berkeley, California, EUA, disponible en <http://www.isaac.cs.berkeley.edu/isaac/mobicom.pdf>, accedido el 13/02/2004.
4. Boström Tomas, Tomas Goldbeck-Löwe y Ralf Keller (2002). "Ericsson mobile Operator WLAN solution", *Ericsson Review*, **79**(1): 36-43.
5. Cardona, Narcís (1995). *Cálculo de la propagación en comunicaciones móviles mediante Modelos Digitales del Terreno (MDT)*, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, España.
6. Carlson A. Bruce, Paul B. Crilly y Janet C. Rutledge (2002). *Communication Systems, an introduction to signals and noise in electrical communication*, 4ª edición, Mc Graw-Hill, Nueva York, EUA.
7. Cheung, David y Cliff. A. Prettie (2002). "Path loss comparison between the 5 GHz UNII Band (802.11a) and the 2.4 GHz ISM Band (802.11b)", Intel Labs, Intel Corp., disponible en [http://impulse.usc.edu/resources/802\\_11a-vs-b\\_report.pdf](http://impulse.usc.edu/resources/802_11a-vs-b_report.pdf), accedido el 5/06/2004.
8. Cichon D. J., T. Zwick y J. Lähteenmäki (1995). "Ray optical indoor modeling in multifloored buildings: Simulations and measurements", Proc. IEEE International Antennas and Propagation Symp. AP-S'95, Newport Beach, EUA: 522-525.
9. Cichon, D. J. y T. Kürner (1996). "Propagation prediction models", En: *Digital Mobile Radio Towards Future Generation Systems, Cost 231, Final Report*, Cap. 4, Eraldo Damosso y Luis M Correia (eds.), COST 231 Management Committee.

10. Davies, Wynne (2000). "The Great Wireless LAN Puzzle", *Telecommunication*, **34**(10): 38-44.
11. Erlanger, Leon (2003). "Real security for wireless LANs", *PC Magazine*, **22**(13): 72.
12. Harris, Shon (2001). "802.11 security shortcomings", *Windows 2000 Magazine*, **7**(16): 47-51.
13. Hernado, J. M. (1995). *Transmisión por radio*, 4ª Edición, Editorial Centro de Estudios Ramón Acres, S.A. ETSIT.
14. Honcharenko W., H. L. Bertoni, J. L. Dailing, J. Qian y H. D. Yee (1992). "Mechanisms governing UHF propagation on single floors in modern office buildings", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **41**(4): 496-504.
15. Huber, Josef (2002). "W-LAN no Threat to MNOs", *Telecommunication*, **36**(9): 30-34.
16. Huckaby, Tim (2001). "Is 802.1x the Answer?", *Windows 2000 Magazine*, **7**(16): 50.
17. Kreuzgruber P., P. Unterberger y R. Gahleitner (1993). A ray splitting model for indoor radio propagation associated with complex geometries, Proc. IEEE VTC' 93, New Jersey, EUA: 227-230.
18. Kumar Vinod, François Carrez y John Riganati (2001). "Principales tecnologías para redes radio ad hoc", *Revista de Telecomunicaciones de ALCATEL*, (3): 207-209.
19. Levillain, Philippe (2002). "Red Local Inalámbrica Para Empresas", *Revista de Telecomunicaciones de ALCATEL*, (4): 287-91.
20. Motley, A.J. y J.M Keenan (1990). "Radio Coverage in Buildings", *British Telecom Technology Journal*, **8**(1): 19-24.
21. Riezenman, Michel J. (2002). "The ABCs of IEEE 802.11", *IEEE Spectrum*, **39**(9): 20.
22. Stalling, Williams (2000). Wireless LANs. En: *Local and Metropolitan Area Networks*, 6ª Edición, Cap.10, Prentice Hall, pp. 374-379.
23. Tamminem, Jani (2002) "2.4 GHz WLAN radio interface", Universidad Tecnológica de Tampere, disponible en <http://www.radionet.com/FileRoot/265397.pdf>, accedido el 27/05/2004.
24. Tarokh, Vahid y Saeed S. Ghassemzadeh (2002). "The ultra-wideband indoor path loss model", *IEEE 802.15 Working Group for Wireless Personal Area Network (WPANs)*, disponible en [http://grouper.ieee.org/groups/802/15/pub/2002/Jul02/02277r1P802-15\\_SG3a-802.15-UWB-Propagation-Path%20Loss-Model.doc](http://grouper.ieee.org/groups/802/15/pub/2002/Jul02/02277r1P802-15_SG3a-802.15-UWB-Propagation-Path%20Loss-Model.doc), accedido el 7/06/2004.

25. Válek M., S. Zvánovec y P. Pechač (2002). "Indoor Propagation Measurement for Wireless Systems Operating in 2.45 GHz ISM Band", *Radioengineering*, **11**(Agosto): 48-52.
26. Weatherspoon, Sultan (2000). "Overview of IEEE 802.11b Security", Network Communications Group, Intel Corporation, disponible en [http://www.intel.com/technology/itj/q22000/articles/art\\_5a.htm](http://www.intel.com/technology/itj/q22000/articles/art_5a.htm), accedido el 11/02/2004.
27. Wynne, Davies (2000). "The great wireless LAN puzzle", *Telecommunications*, **34**(10): 38-44.

# Anexos



## Anexo I

**Bandas de frecuencia disponibles en los 2.4 y 5 GHz para los servicios WLAN en diferentes regiones.**

Región	2400-2454 MHz	2454-2483.5 MHz	4900-5000 MHz	5150-5250 MHz	5250-5350 MHz	5470-5725 MHz	5725-5875 MHz
Norteamérica PIRE	1W <u>Bluetooth</u> : 100 mW		Denegado	UNII-I 50 mW (interior)	UNII-II 250 mW (int/ext)	Denegado	UNII-III [5725-5825] 1W (int/r) 4 W (FWA) 200 mW (pto-a-pto)
Europa PIRE	100 mW (interior/exterior) (Grecia, Hungría, Holanda y Portugal, sólo en interiores)		Denegado	200 mW (interior)		Exc. Austria, Grecia y Hungría 1W (int/ext) (Holanda, sólo interiores)	Denegado
Japón PIRE	[2471-2497 GHz]		Aprox. 200 mW <u>Estación Móvil</u> : Sin Aut. (Exc. PIRE>200mW) <u>Estación Base</u> : Con Aut.	200 mW (interior)	En estudio	Denegado	
Australia PIRE				200 mW (interior)		Denegado	1W
España PIRE	[2445-2475] 100 mW (interior)		Denegado	200 mW (interior)		1W (int/ext)	Denegado
Francia PIRE	100 mW (int/ext)	Interior: 100mW Exterior: 10 mW (Aut. <100 mW en exteriores privados)	Denegado	200 mW (interior)		En estudio	

## Anexo II

### Anexo II-A

Haciendo uso de las ecuaciones (2.7a) y (2.7b), referidas en el Capítulo 2, puede obtenerse en MatLab el gráfico correspondiente a la figura II-A.

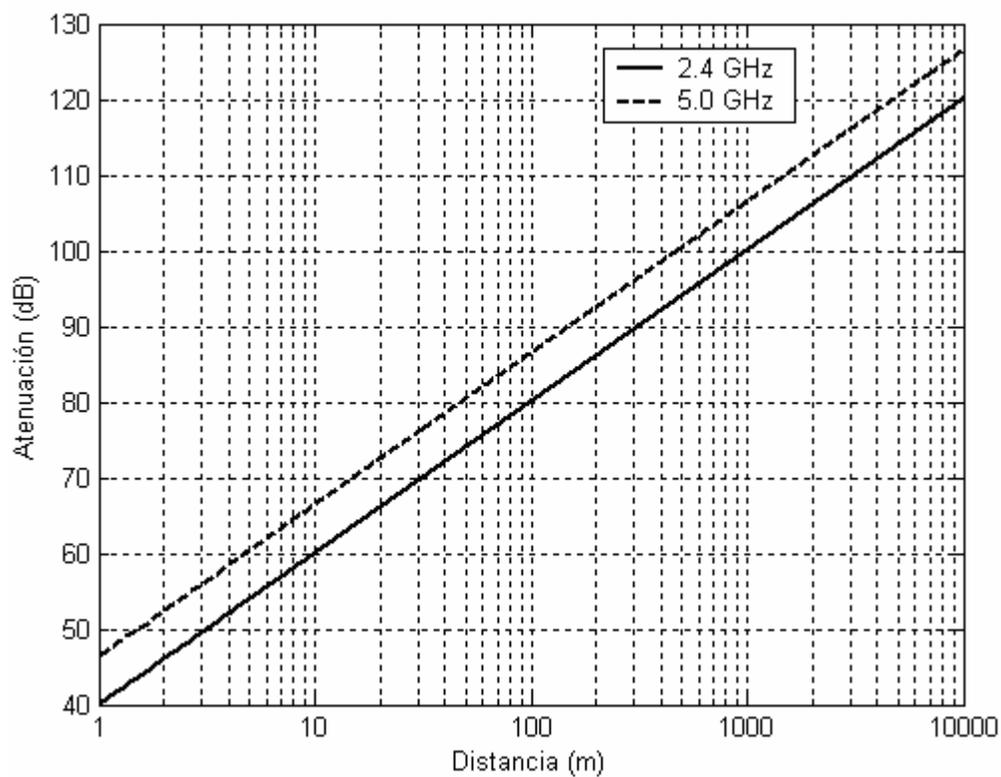


Figura II-A Atenuación en condiciones de espacio libre para 2.4 y 5 GHz.

#### Procedimiento:

```
>> d=1:1000;
>> L2=40.05+20*log10(d);
>> L5=46.43+20*log10(d);
>> semilogx(d,L2,'k'); grid;
>> hold on;
>> semilogx(d,L5,'k:');
```

## Anexo II-B

A partir del gráfico mostrado a continuación, puede calcularse de forma aproximada las pérdidas por propagación en condiciones de espacio libre.

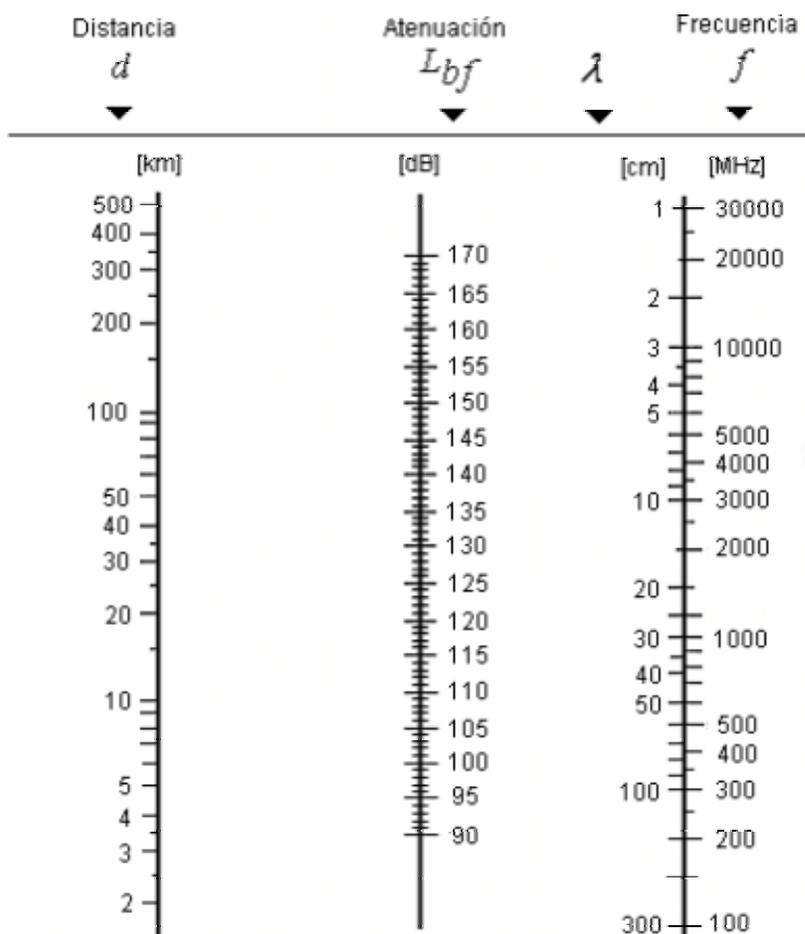


Figura II-B Método práctico para el cálculo de atenuación en condiciones de espacio libre.

Tomando como referencia la distancia entre las antenas (de 2 a 500 Km) y la frecuencia (entre 100 MHz y 30 GHz), se traza una recta que una a ambos puntos correspondientes a las columnas primera y última respectivamente, obteniéndose el valor de la atenuación en la intercepción con la segunda.

## Anexo III

En la figura III-A se muestra la simulación de los resultados obtenidos en el ejemplo ilustrativo del epígrafe 3.3.

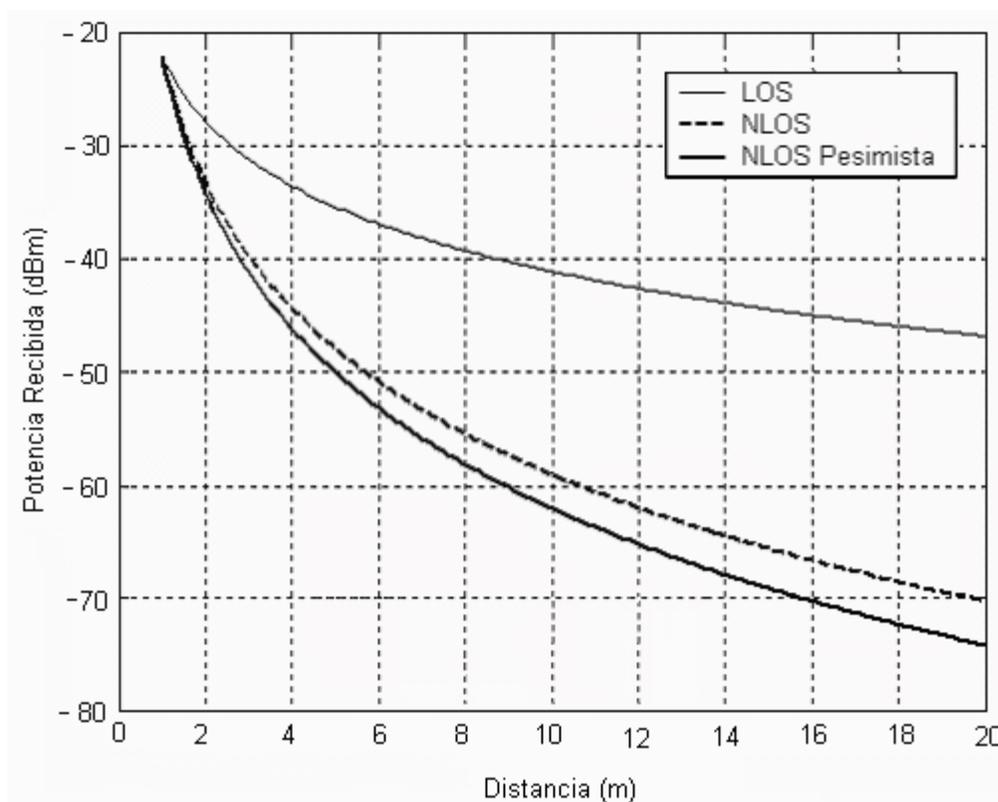


Figura III-A Simulación de los resultados obtenidos en el ejemplo del epígrafe 3.3.

### Procedimiento:

```
>> d=1:0.1:20;
>> PrLOS=-22-19*log10(d);
>> PrNLOS=-22-37*log10(d);
>> PrNLOSP=-22-40*log10(d);
>> hold on; grid;
>> plot(d,PrLOS,'k');
>> plot(d,PrNLOS,'k');
>> plot(d,PrNLOSP,'k');
```

## Anexo IV

A continuación se explica de forma detallada el uso de una hoja de Excel programada para el cálculo de radioenlaces con tecnología *BreezeNET* dentro de la banda de los 2.4 GHz. Esta herramienta es utilizada por COPEXTEL para tales fines.

The image shows an Excel spreadsheet with the following data and callouts:

	A	B
8		
9	<b>Datos del Enlace</b>	
10		
11		
12	Frecuencia:	2450 MHz
13	Sensibilidad del Receptor:	-82 dBm
14	Potencia de transmisión:	17 dBm
15		
16	Velocidad de datos (Mbps)	1
17		
18	Margen de señal deseado	17 dB
19	Margen de señal recomendado	17 dB
20		
21		6,21 Miles
22	Distancia del enlace	10 km
23		
24	-----Parámetros de los sitios-----	
25		
26	Kit de Antena	Sitio A: UNI-24, Sitio B: UNI-24
27		
28		
29	Ganancia de Antenas	24, 24 dBi
30	Atenuación del cable/100 ft	6,8, 6,8 dB
31	Largo del cable	50, 50 ft
32		
33	Protector de rayos	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>
34	Pérdida de conectores	0,5, 0,5 dB
35	Otros	0, 0 dB
36	Cable de extensión	Ninguno, Ninguno
37		

Callouts and Explanations:

- Promedio para el rango de frecuencia utilizado por BreezeNET**: Points to the frequency value (2450 MHz).
- Selección automática a partir de la razón de datos requerida**: Points to the data rate (1 Mbps).
- Valor fijo para los diseños BreezeNET**: Points to the receiver sensitivity (-82 dBm) and transmission power (17 dBm).
- Razón entre 1, 2 y 3 Mbps**: Points to the data rate input.
- El valor es generado automáticamente en función de la distancia del enlace. Puede ser modificado según se requiera.**: Points to the signal margin (17 dB).
- Distancia**: Points to the link distance (6.21 Miles / 10 km).
- Selección del Kit de las antenas.**: Points to the antenna kit selection (UNI-24).
- Valores generados automáticamente en función del Kit de antena seleccionado**: Points to the antenna gain (24 dBi) and cable attenuation (6.8 dB).
- Otras pérdidas o ganancias a considerar.**: Points to the other losses/gains (0 dB).
- Escoger el cable de extensión utilizado.**: Points to the extension cable selection (Ninguno).
- Para si se colocan protectores de rayos**: Points to the lightning protector checkbox.

Figura IV-A Parámetros necesarios a especificar.



# *Abreviaturas*



## Abreviaturas

- 1SM** (*One-Slope Model*) Modelo de Pendiente Única, empleado para la predicción de las pérdidas por propagación ajustando el valor de una pendiente o exponente.
- AP** (*Access Point*) Punto de Acceso, dispositivo encargado de establecer la comunicación entre una estación en una WLAN con la red local correspondiente.
- ATM** (*Asynchronous Transfer Mode*) Modo de Transferencia Asíncrono, red de transmisión de dato, voz y video.
- BSS** (*Basic Service Set*) Grupo de Servicio Básico, conjunto de estaciones que compiten por acceder a un mismo AP conectado a un sistema de distribución.
- COST-231** (*Cooperation in the field of Scientific and Technical Research*) Cooperación en el campo de la Investigación Científica y Técnica encargada de los proyectos de la propagación de la onda y del planeamiento de redes de radio. Entre los más importantes están: COST-273 (Hacia las Redes Móviles de Multimedia De Banda Ancha), COST-259 (Comunicaciones Inalámbricas Flexibles Personalizadas), COST-231 (Radio Móvil Digital Hacia Los Sistemas de la Futura Generación), COST-207 (Comunicaciones Móviles de Radio en el Terreno Digital).
- CSMA/CA** (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Eliminación de Colisión, donde todas las estaciones comparten el mismo radio canal y compiten por acceder al medio.
- DAB** (*Digital Audio Broadcasting*) Es considerada un tipo de radiodifusión digital capaz de proporcionar calidad de CD para el audio, una variedad de servicios de datos y excelente calidad de recepción en un entorno inalámbrico. *Eureka-147* es el estándar correspondiente al DAB europeo.
- DBPSK** (*Differential Binary Phase Keying*) Modulación Digital de Fase Diferencial Binaria.
- DFS** (*Dynamic Frequency Selection*) Selección Dinámica de Frecuencia.

- DSM** (*Dual-Slope Model*) Modelo de Doble Pendiente, al igual que el de pendiente simple (ver 1SM), pronostica las pérdidas por propagación, pero ajustando el valor de dos pendientes o exponentes.
- DSSS** (*Direct Sequence Spread Spectrum*) Técnica de Espectro Extendido de Secuencia Directa.
- DVB** (*Digital Video Broadcasting*) Estándar internacional de radiodifusión digital para aplicaciones de video, voz y dato. DVB puede ser aplicable a las comunicaciones vía satélite (DVB-S), por cable (DVB-C) o en sistemas terrestres (DVB-T).
- ESS** (*Extended Service Set*) Grupo de Servicio Extendido, formado por la unión de dos o más BSS.
- ETSI** (*European Telecommunication Standards Institute*) Instituto Europeo de Estándares de Telecomunicaciones.
- FCC** (*Federal Communications Commission*) Comisión Federal de Comunicaciones, encargada de las regulaciones en el ámbito de las comunicaciones en Estados Unidos y enmarcada en la asignación y uso del espectro electromagnético de este país.
- FDTD** (*Finite Difference Time Domine*) Dominio de Tiempo de Diferencia Finito, grupo de modelos semi-deterministas discutidos en el COST-231.
- FHSS** (*Frequency Hopping Spread Spectrum*) Técnica de Espectro Extendido por Salto de Frecuencia.
- FWA** (*Fixed Wireless Access*) El Acceso Inalámbrico Fijo es un sistema de radio para la conexión directa entre un suscriptor y el centro de conmutación de la red de telecomunicaciones fija.
- GO** (*Geometric Optic*) Óptica Geométrica, grupo de modelos semi-deterministas entre los que se encuentran el de lanzamiento de rayos y el de las imágenes.
- GFSK** (*Gaussian Frequency Shift Keying*) Modulación de frecuencia donde la señal digital es filtrada previamente mediante un filtro gaussiano.
- HiperLAN** (*High Performance Radio LAN*) Estándar inalámbrico europeo de alto desempeño en redes WLAN. Se le reconocen 4 tipos fundamentales: HiperLAN 1 y 2, HiperACCESS e HiperLINK, cada uno con características y aplicaciones específicas.
- IAPP** (*Inter-Access Point Protocol*) Protocolo de comunicación entre puntos de acceso.

- IBSS** (*Independent Basic Service Set*) Grupo de Servicio Básico Independiente, conjunto de estaciones que se comunican entre sí en ausencia de un punto de acceso, característica típica de las redes *ad hoc*.
- IEEE** (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
- IEEE 802** Comité de la IEEE organizado para crear los estándares de las Redes de Área Local. La IEEE 802.11 especifica las normas para la redes LAN inalámbricas.
- ISI** (*Intersymbol Interference*) Interferencia intersímbolo.
- ISM** (*Industrial Scientific Medical*) Bandas del espectro electromagnético destinadas a las aplicaciones industriales, científicas y médicas. Comprenden los rangos de frecuencia 902-928 MHz, 2.4-2.4835 GHz y 5.725-5.85 GHz.
- ISO** (*International Standard Organization*) Organización Internacional de Estándares que trabaja en conjunto con ITU-T para la definición de normas en el ámbito de las comunicaciones y otras disciplinas.
- IST** (*Information Society Technologies*) Tecnologías de la Sociedad de la Información, programa de investigación y desarrollo integrado por asociaciones industriales encargadas de realizar las propuestas financiadas por la Comisión de la Comunidad Europea. *MIND* (IST-2000-28584), es uno de sus proyectos destinados a las redes móviles IP.
- ITU-T** (*International Telecommunication Union–Telecommunication*) Organismo que se ocupa de las normalizaciones en el ámbito de las telecomunicaciones. Sede en Ginebra, Suiza.
- LAN** (*Local Area Network*) Red de Área Local.
- LOS** (*Line-of-Sight*) Línea visual, total visibilidad transmisor-receptor.
- MAC** (*Medium Access Control*) Subnivel de Control de Acceso al Medio dentro del nivel de enlace en una red LAN.
- MAN** (*Metropolitan Area Network*) Red de Área Metropolitana.
- MWM** (*Multi-Wall Model*) Modelo de Pared Múltiple, empleado en el cálculo de pérdidas tomando con profundidad las atenuaciones respectivas de cada pared o piso.
- NIC** (*Network Interface Card*) Tarjeta de Interfaz de Red, dispositivo equipado con una antena para la comunicación inalámbrica en una PC.

- NLOS** (*Non-Line-of-Sight*) Fuera de la línea visual, no existe una línea recta que una visualmente a las entidades del enlace.
- OFDM** (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) Multiplexación por División de Frecuencia con portadoras Ortogonales.
- OLOS** (*Obstructed-Line-of-Sight*) Línea visual obstruida, la línea visual es bloqueada parcialmente por un obstáculo.
- PAN** (*Personal Area Network*) Red de Área Personal.
- PIRE** (*Potencia Isotrópica Radiada Equivalente*) Resultado del producto de la potencia suministrada a la antena por la ganancia isotrópica de esta, generalmente referido a su ganancia de potencia máxima.
- PWLAN** (*Public Gíreles Local Area Network*) Red Pública Inalámbrica de Área Local, una modalidad de las redes WLAN destinada a locales públicos de atención al cliente.
- QoS** (*Quality os Service*) Calidad de Servicio, concepto que permite asegurar determinadas prestaciones al usuario.
- RLM** (*Ray Launching Model* ) Método de Lanzado de Rayos, modelo semi-determinista empleado en la predicción de pérdidas por propagación basándose en los mecanismos de propagación.
- SHF** (*Super High Frequency*) Súper alta frecuencia, banda comprendida entre los 3 y 30 GHz.
- SIDD** (*Service Set Identifier*) Identificador del Grupo de Servicio, seudónimo de red que identifica el perímetro de cobertura de uno o más puntos de accesos.
- SWAP** (*Shared Wireless Access Protocol*) Protocolo de Acceso Inalámbrico Compartido, nombre dado por el Grupo de Trabajo HomeRF a su especificación en las comunicaciones inalámbricas para voz y datos.
- TCP/IP** (*Transmission Control Protocol /Internet Protocol*) Protocolos del ámbito de Internet que forman el núcleo del funcionamiento.
- TDMA** (*Time Division Multiple Access*) Procedimiento de acceso sobre un mismo medio mediante la multiplexación por división de tiempo.
- TPC** (*Transmition Power Control*) Control de Potencia de Transmisión.
- UE** Unión Europea, referido a los países pertenecientes a este continente.
- UHF** (*Ultra High Frequency*) Banda de frecuencias ultra altas entre 300 y 3000 MHz.

- UMTS** (*Universal Mobile Telecommunications System*) Sistema de Telecomunicaciones Móvil Universal, plataforma de prestaciones móviles preferida para los servicios y aplicaciones con gran contenido, que evoluciona para integrar todos los servicios ofrecidos por las distintas tecnologías y redes actuales y se podrá utilizar con casi cualquier tipo de terminal.
- USB** (*Universal Serial Bus*) Bus Serie Universal, puerto “*plug-and-play*” con múltiples aplicaciones, con el que actualmente vienen equipados los ordenadores.
- WB** (*Workgroup Bridge*) Dispositivo que garantiza la conexión inalámbrica de una red LAN cableada remota con un punto de acceso.
- WECA** (*Wireless Ethernet Compatibility Alliance*) Alianza de Compatibilidad en Ethernet Inalámbrica, asociación internacional encargada de certificar la interoperatividad de las redes LAN inalámbrica. Es además reconocida por el alias Wi-Fi (*Wireless Fidelity*), marca o certificación de aquellos productos acogidos a esta normativa.
- WEP** (*Wired Equivalent Privacy*) Equivalente a Privacidad Cableada, protocolo de seguridad en redes WLAN.
- Wi-Fi** (*Wireless Fidelity*) Ver WECA
- Wi-Fi5** Certificación Wi-Fi para la tecnología dentro de la banda de los 5 Ghz.
- WLAN** (*Wireless Local Area Network*) Red de Área Local Inalámbrica.
- WPA** (*Wi-Fi Protected Access*) Acceso Protegido Wi-Fi, protocolo de seguridad altamente confiable. Consta de una versión mejorada nombrada WPA2.
- WRC** (*World Radiocommunication Conference*) Conferencia Internacional de Radiocomunicaciones, WRC-2003, celebrada en Génova, el 9 de junio del referido año.