

CAPÍTULO 3: MÉTODOS DE MEDIDA Y MODELADO DEL CANAL EN INTERIORES

3.1.- Propagación en Interiores

Se ha visto en el capítulo anterior que el canal radio móvil en entornos interiores (Canal *Indoor*) difiere considerablemente del de entornos exteriores (Canal *Outdoor*), por otra parte mucho más estudiado. En cualquier caso, se ha realizado un gran esfuerzo investigador en el estudio de las condiciones de propagación en el interior de edificios, la mayor parte del cual ha sido en la forma de medidas experimentales. Existe una amplísima bibliografía al respecto, pero puede encontrarse resumida en [15] y en [9].

En este capítulo, se describirá gran parte de la literatura existente relacionada con las medidas del canal en interiores que se han venido realizando hasta la fecha, así como de los modelos de dicho canal basados en esos resultados.

Se hará especial hincapié en aquellos resultados presentados recientemente a lo largo de las distintas reuniones del COST 231. El COST (Cooperación Europea en el Campo de la Investigación Científica y Técnica, también conocido como EURO-COST), creado en 1971 por 19 países europeos, constituye un marco de cooperación para las acciones de investigación concertadas a nivel europeo, denominadas acciones COST, que cuenta con el apoyo de la Unión Europea.

Fundado en 1971, el COST es un marco intergubernamental para la cooperación europea en el campo de la investigación científica y técnica. Las acciones COST cubren la investigación básica y precompetitiva así como actividades de utilidad pública.

La Acción número 231 se ha ocupado de estudiar distintos aspectos de las redes de Comunicaciones Inalámbricas terrestres, incluyendo las personales, presentando sus resultados en múltiples reuniones de trabajo celebradas desde abril de 1989, hasta abril de 1996, después de tres años de prórroga. En esta acción han trabajado distintas empresas, operadores, universidades y otros centros de investigación de toda Europa.

Para el estudio y la planificación de la propagación en escenarios en interiores existen actualmente dos tipos de técnicas bien diferenciadas [20].

Una de ellas consiste en la utilización de herramientas deterministas, se refiere al denominado modelo de trazado de rayos (*ray tracing*), con el fin de predecir, no solamente la potencia recibida, sino un conocimiento mucho más completo del canal, incluyendo el perfil de retardo de potencias ("*power delay profile*") en cada

localización. Estas técnicas están basadas en aproximaciones de alta frecuencia y fundamentalmente en la óptica geométrica (GO) completada con la teoría uniforme de la difracción (*UTD*), y utilizan diferentes algoritmos de trazado y lanzamiento de rayos. Si bien estas técnicas están tomando cada vez mayor importancia, debido fundamentalmente a la mayor velocidad y capacidad de los ordenadores y al desarrollo de algoritmos de ejecución más rápidos y eficientes, todavía quedan por resolver problemas, relacionados con la precisión y la caracterización electromagnética para estructuras de edificación y materiales reales, incluido el mobiliario.

Por otro lado se han venido considerando técnicas empírico estadísticas, basadas en un elevado número de medidas y mediante una clasificación de diferentes tipos de edificios, y utilizando sencillos modelos de regresión donde se incluyen la atenuación producida por suelos y paredes, así como por otros materiales y estructuras. Es necesario indicar que esta atenuación es simplemente una caracterización estadística y no electromagnética. La principal ventaja de estas técnicas es su rapidez y simplicidad lo que permite una rápida y eficiente planificación de coberturas e interferencias en interiores pero su principal desventaja es que estas técnicas poseen una precisión limitada.

En entornos en interiores, generalmente, la trayectoria entre transmisor y receptor no se encuentra en línea de vista LOS. Los sistemas que allí operan están en medio de una serie de obstáculos, de características diferentes, que dan origen a diversos mecanismos de propagación. Además de las pérdidas en espacio libre, los fenómenos más importantes son: reflexión, dispersión y difracción [1][5].

3.2.- Aspectos generales del modelado del canal en interiores

La predicción de las características de propagación entre dos antenas situadas en el interior de un edificio, es especialmente importante para el diseño de sistemas de telefonía sin hilos (*cordless telephone*), así como para las redes locales sin hilos (WLAN). También el diseño de sistemas celulares en los que se tenga prevista la instalación de estaciones base en el interior de edificios especiales (grandes almacenes, oficinas, etc.), necesitan de un conocimiento amplio de dichas características de propagación.

Para obtener con exactitud los detalles de la propagación, habría que resolver las ecuaciones de Maxwell con las condiciones de contorno que expresaran las propiedades físicas de los materiales que forman el edificio y que dispersan las ondas.

Desafortunadamente, la solución numérica de dicho problema no es todavía una opción rentable para entornos complejos a altas frecuencias. Por ello, durante los últimos años se han venido desarrollando multitud de modelos de propagación, con el fin de que sean usados en las fases de desarrollo y/o evaluación de las redes de Comunicaciones Inalámbricas (en el cálculo de las áreas de cobertura o en la selección de las localizaciones óptimas para las estaciones transmisoras, por ejemplo).

Un modelo de propagación es un conjunto de expresiones matemáticas, diagramas y algoritmos usados para representar las características radio de un ambiente dado. Generalmente los modelos de predicción se pueden clasificar en empíricos o estadísticos, teóricos o deterministas o una combinación de estos dos (semi-empíricos).

Los modelos de propagación de radio también se pueden clasificar según la zona de cobertura en dos tipos principales: modelos en exteriores y modelos en interiores. Además, ateniéndonos al tamaño de la zona de cobertura, los modelos en exteriores se pueden dividir en modelos de propagación en zonas grandes (macrocelas) y de zonas pequeñas (microcelas o picoceladas).

Existen más modelos de propagación para sistema inalámbricos en exteriores, debido a que la comunicación inalámbrica en estos entornos se viene utilizando desde hace mucho más tiempo: radio, televisión,... Estos modelos no tienen en cuenta las características particulares de la propagación en interiores.

El campo de la propagación en interiores es relativamente nuevo y las primeras investigaciones datan de primeros de los 1980s. La llegada de las WLAN hace todavía más necesario el disponer de modelos en interiores de predicción de cobertura.

El canal en interiores difiere considerablemente del canal en exteriores. Además de que hablamos de micro-celadas, en interiores, el entorno es mucho más influyente que la distancia entre las antenas. Las paredes internas y externas, junto con los suelos y techos, provocan grandes atenuaciones. El mobiliario y las estructuras metálicas incrustadas en paredes y techos hacen que los procesos de dispersión y difracción sean más importantes que en entornos abiertos.

En ambientes interiores existen actualmente dos tipos de técnicas bien diferenciadas. Una de ellas consiste en la utilización de herramientas deterministas con el fin de predecir, no solamente la potencia recibida, sino un conocimiento mucho más completo del canal, incluyendo el perfil de retardo de potencia ("*power delay profile*") en cada localización.

Por otro lado se han venido considerando técnicas empírico estadísticas, basadas en un elevado número de medidas y mediante una clasificación de diferentes tipos de edificios, y utilizando sencillos modelos de regresión donde se incluyen la atenuación producida por suelos y paredes, así como por otros materiales y estructuras. Algunos estudios recientes demuestran que los resultados obtenidos mediante las dos técnicas

anteriormente mencionadas son similares cuando se aplican a edificios diferentes a los que se han ajustado los modelos.

El nivel de potencia de una señal que se propaga a través del medio inalámbrico va variando debido principalmente a cuatro efectos: pérdidas de propagación en espacio libre, desvanecimientos macroscópicos (o desvanecimientos lentos o a largo plazo) y desvanecimientos microscópicos (o desvanecimientos rápidos o a corto plazo), reflexión y difracción. Estos efectos se representan en las figura 3.1 y 3.2 y 3.3.

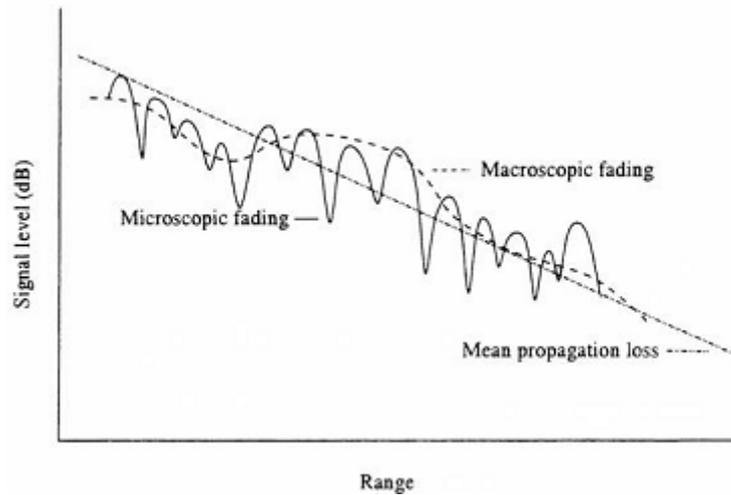


Figura 3.1: Pérdida de propagación (*propagation loss*) y desvanecimiento (*fading*).

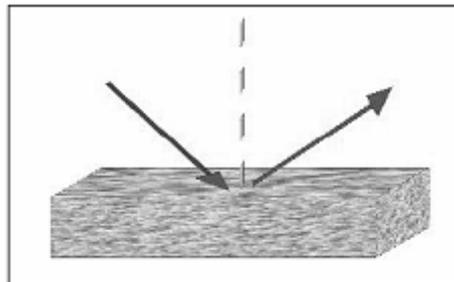


Figura 3.2: Reflexión

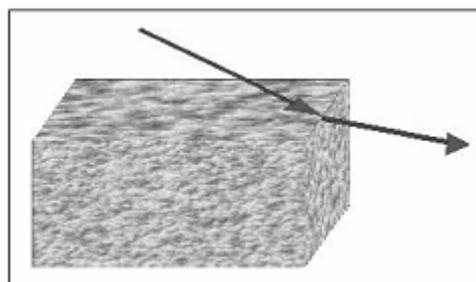


Figura 3.3: Difracción

3.2.1.- Pérdidas Espacio Libre

Es el más simple mecanismo de propagación. Considera línea de vista entre las antenas, y asume que la separación entre antenas es tal, que ninguna está en el campo cercano de la otra. De este modo la potencia recibida puede calcularse directamente en función de la distancia entre antenas; si se conoce la potencia transmitida. La potencia recibida por una antena a una distancia d es dada por la ecuación de *Friss* para espacio libre:

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L^2} \quad (3.1)$$

Las pérdidas de propagación son las responsables de que la potencia de la señal disminuya conforme aumenta la distancia recorrida. Dichas pérdidas dependen de la distancia según una ley exponencial. En el vacío el exponente de pérdidas es igual a 2 mientras que en entornos reales toma valor en el rango entre 2,5 y 6.

3.2.2.- Desvanecimiento

El desvanecimiento microscópico es el fenómeno según el cual se pueden observar rápidas fluctuaciones en la potencia recibida en el receptor cuando se representa como función de la distancia entre la estación transmisora y receptora.

Dichas variaciones del nivel de señal pueden ser de incluso 40 dB para un incremento de la distancia equivalente a una fracción de la longitud de onda. El desvanecimiento microscópico es consecuencia del fenómeno conocido como multicamino o multitrayecto (la señal llega al receptor a través de un cierto número de caminos distintos). La señal total recibida es la suma coherente de las señales individuales que llegarán con diferentes fases (debido a las distintas longitudes de las trayectorias recorridas por cada uno de los rayos individuales) y, de esta manera, se produce el desvanecimiento (cuando se suman destructivamente).

El desvanecimiento macroscópico es el fenómeno según el cual la señal media recibida sufre fluctuaciones cuando el receptor se mueve a lo largo de una trayectoria.

Estas variaciones de la señal media ocurren como consecuencia de la presencia de obstáculos en el entorno, que atenúan la señal.

3.2.3.- Reflexión

Cuando una onda electromagnética choca contra un objeto cuyas dimensiones son mucho mayores que la longitud de onda de la señal RF, parte de la señal es reflejada desde la superficie y otra parte penetra a través de la superficie (refracción). El ángulo de la señal reflejada es el mismo de la señal incidente. Para que haya reflexión, la superficie tiene que ser “lisa”, y debe de cumplir la condición de rugosidad. Las pérdidas por reflexión dependen de las propiedades eléctricas del medio a ambos lados de la superficie reflectante, la frecuencia de la señal, el ángulo de incidencia, y la polarización de la onda electromagnética.

3.2.4.- Difracción

Ocurre cuando el trayecto de propagación entre transmisor y receptor se ve obstruido por objetos que poseen esquinas o bordes marcados. Las ondas doblan en dicho borde del obstáculo, incluso cuando no hay línea de vista entre transmisor y receptor.

3.3.- Modelos de Propagación

Para los sistemas de comunicación inalámbrica en un entorno de prueba de interiores, las pérdidas de potencia que sufre la señal transmitida a lo largo de su propagación se pueden calcular a través de los siguientes modelos.

El modelo se construye normalmente incorporando la información del canal, para que forme parte de la herramienta analítica, numérica o de simulación, y así ayude a un mejor conocimiento de su comportamiento. Con respecto al modelado de las características más representativas del canal, se debe tener un fiel conocimiento de los mecanismos físicos de propagación, ya que es la base elemental de su comportamiento. Este conocimiento se debe obtener a través de la combinación de suposiciones teóricas y de medidas físicas (ya que en los complejos escenarios reales, el proceso de la

propagación de ondas es demasiado complicado para permitir un enfoque puramente teórico).

En secciones sucesivas se mostrarán ejemplos de cada una de las categorías en que pueden ser divididos los distintos modelos de propagación en interiores. A saber:

- Modelos empíricos de banda estrecha, que solamente predicen pérdidas de propagación y que están basados en campañas de medidas;
- Modelos empíricos de banda ancha, que predicen la forma aproximada de los Perfiles de potencia-retardo (PDP) a partir del *delay spread* promediado de distintas medidas en entornos similares;
- Modelos que predicen la variación temporal del canal;
- Modelos deterministas que intentan simular físicamente la propagación de las ondas de radio, y que pueden permitir caracterizar el canal tanto en banda estrecha como en banda ancha.

En función de las necesidades del diseño al que se vaya a aplicar el modelo, se deberá escoger entre uno de los modelos siguientes:

- Modelos matemáticos
 - Modelos empíricos o estadísticos
 - Modelos teóricos
 - Modelos deterministas
 - Modelos estocásticos
 - Modelos de caja negra
- Modelos matemáticos

Son procedimientos matemáticos que describen el comportamiento del fenómeno modelado. Dependiendo de la complejidad de las fórmulas matemáticas aplicadas y del número de parámetros de las que dependan, pueden llegar a necesitar gran cantidad de potencia de computación para generar los resultados.

- Modelos empíricos o estadísticos

Se basan en la extrapolación estadística de resultados a partir de medidas del fenómeno realizadas sobre el terreno.

La principal ventaja de este tipo de modelos es que se tienen en cuenta de forma implícita las influencias propias del entorno en su conjunto, sin ser reconocidas cada una de ellas de manera aislada.

Por el contrario, su precisión depende no sólo de la precisión de las medidas, si no de la similitud entre el entorno donde fueron llevadas a cabo las medidas y el entorno a analizar

- Modelos teóricos

Se basan en los principios fundamentales del medio que se intenta modelar (por ejemplo los principios de la física, si se modelan fenómenos físicos). Pueden ser aplicados en diferentes entornos sin que se vea afectada su precisión.

En la práctica la implementación de modelos teóricos requiere enormes bases de datos de características relativas al entorno, las cuales en la práctica son imposibles de obtener en muchos casos, o muy difíciles de obtener.

Los algoritmos usados por los modelos teóricos son generalmente muy complejos y computacionalmente poco eficientes. Por esta razón su implementación se restringe a pequeñas áreas. Por el contrario, si su implementación es correcta, proporcionan gran precisión en su predicción, en comparación con los modelos empíricos.

- Modelos deterministas

En este tipo de modelos los resultados de la simulación no tienen ninguna distribución de probabilidad, y son valores que sólo dependen de las condiciones de simulación (entradas). Siempre con la misma entrada van a producir la misma salida.

- Modelos estocásticos

Son modelos en los que los resultados del modelo tienen una distribución de probabilidad. La misma entrada no tiene porqué producir los mismos resultados, en distintas simulaciones del modelo.

- Modelos de caja negra

Son modelos en los que sólo se reproduce la entrada y salida del fenómeno, sin preocuparse de lo que pase en el interior.

Los modelos empíricos se usan normalmente para aplicaciones estándar de desarrollo de redes, mientras que los modelos deterministas se adaptan mejor en las aplicaciones que requieren gran precisión. La ventaja de los modelos empíricos, comparados con los deterministas, es que son normalmente menos complejos y que requieren menor cantidad de parámetros de entrada. Sin embargo, no predicen las características instantáneas de la señal o los desvanecimientos en una localización específica del entorno modelado. Para este tipo de predicciones se debe recurrir a un modelo más determinista.

Como se refleja en la figura 3.4, ambos métodos deben complementarse con un conjunto suficientemente amplio de medidas físicas realizadas en el entorno que se va a modelar. Los modelos empíricos aplican esas medidas en la optimización sus parámetros. Los modelos deterministas puros, aunque no incluyen coeficientes empíricos, usan valores físicos como parámetros de entrada, como, por ejemplo, la constante dieléctrica compleja de los materiales del edificio. Además, puesto que la descripción del entorno es siempre aproximada (más o menos idealizada) y no incluye todos los detalles que afectan a la propagación, debe verificarse el buen funcionamiento del modelo determinista comparando sus resultados con las medidas realizadas.

De todas formas, cuando un modelo sea capaz de ofrecer una predicción correcta de las características del canal, evitará la necesidad de realizar amplias campañas de medidas en el edificio en cuestión, con el consiguiente ahorro de tiempo y dinero.

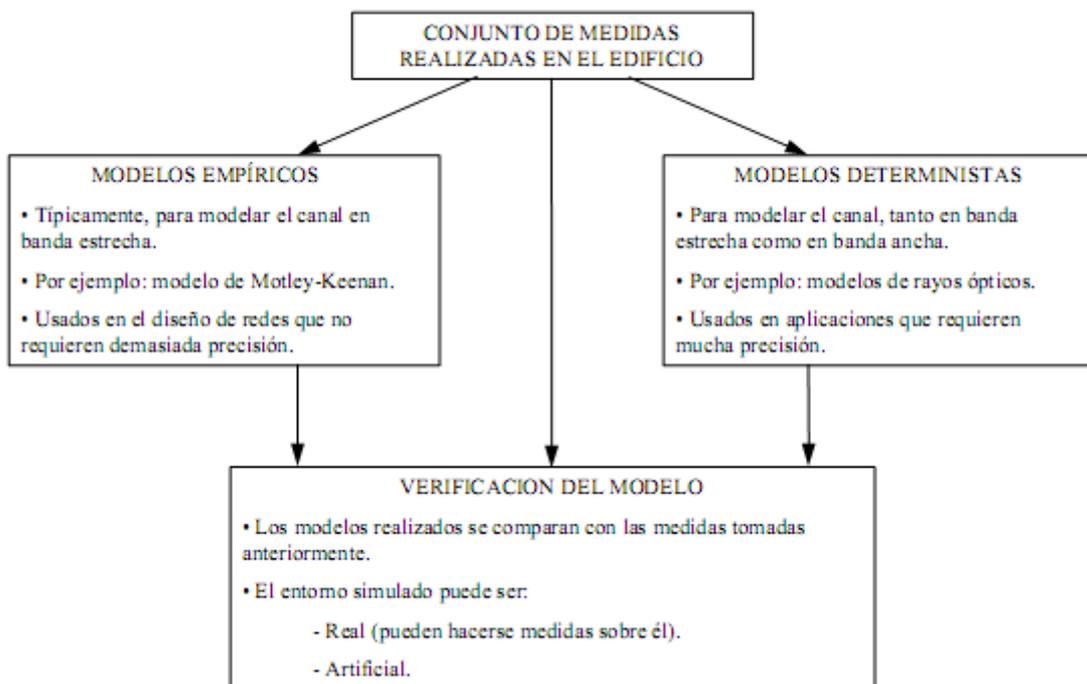


Figura 3.4: Guión para el desarrollo de un modelo de propagación en interiores

3.3.1.- Modelos empíricos de predicción de pérdidas

Como ya se ha comentado anteriormente, con objeto de predecir las pérdidas de propagación y evitar, en la medida de lo posible, la necesidad de realizar medidas in situ, se han desarrollado, entre otros, unos modelos empíricos de predicción de pérdidas basados en campañas de medidas realizadas sobre el terreno. Estos modelos se suelen utilizar para el cálculo de las áreas de cobertura y en la selección de localizaciones óptimas para las estaciones transmisoras.

Suelen venir expresados en forma de una simple ecuación matemática que da como resultado las pérdidas medias de propagación entre el transmisor y el receptor. En estas ecuaciones, que suelen ser función de la distancia, se optimizan mediante regresión, una serie de coeficientes a partir de los datos de campañas de medidas realizadas. Evidentemente, este ajuste minimiza el error del modelo en el edificio en el que se han realizado las medidas; pero si el modelo es lo suficientemente bueno, puede servir para predecir de forma aproximada los resultados en edificios con características similares.

Existen dos tipos de modelos empíricos comúnmente utilizados. Por un lado aquellos que tienen como parámetro fundamental la distancia, y por otro lado aquellos que emplean, además, coeficientes empíricos de pérdidas para los distintos suelos y paredes.

3.3.1.1.- Modelos dependientes exclusivamente de la distancia

3.3.1.1.1.- Modelos exponenciales

En este tipo de modelo, las pérdidas de propagación crecen exponencialmente con la distancia, es decir:

$$L(d) \propto \left(\frac{d}{d_0}\right)^n \quad (3.2)$$

donde L representa las pérdidas medias de propagación, n es el exponente de pérdidas, que es el que controla la velocidad de crecimiento de las pérdidas de propagación con la distancia entre transmisor y receptor d , y d_0 es una distancia de referencia a la que suele darse por valor un metro. Esta relación entre potencia y distancia se convierte en una relación lineal al representar en escala logarítmica los ejes de ordenadas y abcisas.

Precisamente, el parámetro a ajustar es n , la pendiente de pérdidas con el logaritmo de la distancia. Debido al carácter en interiores del modelo, dicha pendiente será, en general, muy superior a la observada en espacio libre ($n = 2$), aunque bajo ciertas condiciones del entorno (pasillos y corredores), puede aparecer un efecto *guía de ondas* que provoque valores de n inferiores a 2. En definitiva, este parámetro suele tomar valores entre 1 y más de 5, dependiendo fuertemente del entorno. Así, en [16] está en torno a 3 en propagación en interiores, mientras que en [17] se dan márgenes desde 1.2 hasta 6.5, dependiendo del tipo de entorno.

El valor de las pérdidas medias de propagación en unidades logarítmicas (dB) puede hallarse, entonces, mediante la siguiente expresión:

$$L = L_0 + 10n \log_{10} \frac{d}{d_0} \quad (3.3)$$

en la que L_0 es una constante, en dB, cuyo valor puede asumirse que es igual a las pérdidas de propagación en espacio libre, para una separación entre transmisor y receptor igual a la distancia de referencia d_0 . O, por el contrario, con el fin de conseguir un mejor ajuste o minimización del error medio, puede optimizarse mediante regresión a partir de las medidas. En este caso, el modelo será biparamétrico.

Tal y como está formulado en (3.2), a este modelo se le ha asignado en el COST 231 el nombre de *One-Slope Model* (ISM).

3.3.1.1.2.- Modelos lineales

Estos modelos son los más sencillos, ya que sólo presentan un único parámetro de ajuste (modelos uniparamétricos), asumiendo que la dependencia del exceso de

pérdidas de propagación con la distancia (descontando las del espacio libre) es de tipo lineal. Uno de los primeros trabajos proponiendo tal tipo de modelos es [18]. En el COST 231 se la ha llamado *Linear Attenuation Model* (LAM), y la expresión que cuantifica las pérdidas medias, en dB, viene dada por:

$$L = L_{fs}(d) + \alpha d \quad (3.4)$$

donde α es el parámetro o coeficiente a ajustar de forma empírica a partir del conjunto de medidas y representa el coeficiente de atenuación del entorno, en dB/m; L_{fs} representa a las pérdidas de propagación en espacio libre y d es la distancia entre la antena transmisora y la receptora.

En [18] se sugieren valores de atenuación lineal entre 0.23 y 0.62dB/m.

A este modelo se le puede añadir también los efectos de las paredes y suelos con el fin de mejorar sus prestaciones, ya que de este modo se aumentan los grados de libertad.

3.3.1.2.- Modelos empíricos dependientes del entorno

Cuando la única información que se tiene en cuenta es la distancia entre el transmisor y el receptor, el error cometido resulta elevado. En los anteriores modelos, los parámetros estimados mediante regresión (n , L_0 , α) dependen mucho de factores como la estructura del edificio, el número de plantas de separación, el número de paredes interpuestas, la disposición de las plantas del edificio, etc. Y no sólo del edificio y los materiales que lo constituyen, sino también del tipo de entorno en que se efectúan las medidas: pasillos, hall, despachos, etc. Sin embargo, pueden usarse como una primera aproximación. De todos modos, para reducir el error será necesario introducir esta información del entorno, lo cual conduce a los modelos empíricos dependientes del entorno.

3.3.1.2.1.- Modelo de Motley y Keenan

Este conocido modelo, propuesto en [19], calcula las pérdidas medias como las producidas en espacio libre más unas pérdidas adicionales por cada pared o suelo que se interpone en el camino directo entre transmisor y receptor.

Los parámetros del modelo son precisamente los coeficientes de atenuación de suelos y paredes. La expresión del modelo que calcula dichas pérdidas en dB a una frecuencia dada, es la siguiente:

$$L(dB) = L_0(dB) + 10n \cdot \log_{10} d(m) + \sum_j k_{wj} \cdot L_{wj}(dB) + \sum_i k_{fi} \cdot L_{fi}(dB) \quad (3.5)$$

donde:

L_0 = pérdidas a la distancia de referencia (1 metro).

n = exponente de pérdidas de propagación.

d = distancia entre el transmisor y el receptor.

L_{wj} = pérdida característica de paredes tipo j.

k_{wj} = número de paredes tipo j entre el transmisor y el receptor.

L_{fi} = pérdida característica de suelos tipo i.

k_{fi} = número de suelos tipo i entre el transmisor y el receptor.

En este modelo, L_0 y n tienden a ser los valores característicos para las condiciones de espacio libre ($L_0= 37$ dB, $n = 2$).

3.3.1.2.2.- Modelo De Múltiples Paredes Cost 231 (CMWM)

Para obtener una mayor exactitud en los resultados, el modelo Keenan-Motley fue modificado incluyendo una función no lineal para el número de suelos atravesados.

Este modelo puede considerarse una evolución del anterior, y ha sido consensuado en el COST 231, recogido en la recomendación ITU-R M.1225.

Básicamente es idéntico, pero solamente se tiene en cuenta un único tipo de suelo ($i = 1$). Por contra, se introduce un factor empírico adicional b , ya que se ha observado que las pérdidas totales debidas a los suelos, son una función no lineal del número de suelos penetrados [21]. Cuando el tamaño de los edificios es pequeño este factor puede eliminarse de la ecuación de pérdidas.

Según este modelo, las pérdidas de propagación L vienen determinadas por:

$$L(\text{dB}) = L_c(\text{dB}) + L_{fs}(\text{dB}) + \sum_j k_{wj} \cdot L_{wj}(\text{dB}) + k_f^{E_f} \cdot L_f(\text{dB}) \quad (3.6)$$

donde:

L_c = pérdidas constantes (valor típico: $L_c = 37$ dB).

L_{fs} = pérdidas por propagación en espacio libre entre el transmisor y el receptor, incluyendo también los efectos de la antena.

L_{wj} = coeficiente de atenuación de paredes tipo j .

k_{wj} = número de paredes tipo j entre el transmisor y el receptor.

L_f = coeficiente de atenuación del suelo. Pérdida característica entre plantas adyacentes.

k_f = número de plantas entre el transmisor y el receptor.

El exponente E_f viene dado por:

$$E_f = \frac{k_f + 2}{k_f + 1} - b \quad (3.7)$$

donde b es una constante que debe ser determinada empíricamente (valor típico: $b = 0,46$).

En general, suele simplificarse la anterior expresión considerando sólo dos tipos de paredes: paredes que no poseen vanos, y paredes que integran puertas o superficies acristaladas. En entornos de oficinas puede ser interesante introducir también en el modelo un coeficiente de pérdidas de tabiques separadores o *soft partitions*, L_{sp} , puesto que se ha demostrado que estos elementos introducen pérdidas lo suficientemente apreciables. Así, se han medido valores entre 0.92 y 1.57 dB [22].

En la tabla 3.1 se puede ver el valor medio considerado según el tipo de muros.

	Descripción	Factor (dB)
Lf	Suelos (estructura típica) - Baldosas - Revestimiento de hormigón - Espesor típico < 30 cm	18.3
Lw1	Muros internos finos - Yeso - Muros con muchos huecos (ventanas)	3.4
Lw2	Muros internos - Hormigón, ladrillos - Mínimo número de huecos	6.9

Tabla 3.1: Valores medios de los factores de pérdida según categoría

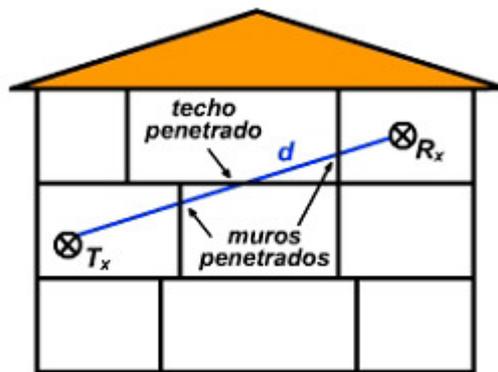


Figura 3.5: Pérdidas por penetración de pisos adyacentes

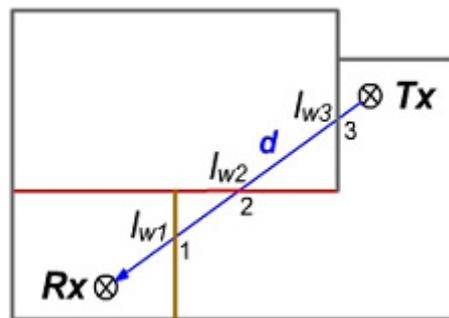


Figura 3.6: Pérdidas por penetración de paredes

En [23] se considera que es posible obtener un mejor ajuste al modelo, especialmente a cortas distancias, si sólo se considera la distancia horizontal entre transmisor y receptor, en lugar de la real. Las dos posibles razones que se apuntan para ello son el hecho de que las pérdidas debidas a los suelos ya están incorporadas en los coeficientes (con lo que no hay que volver a contar el efecto de la distancia vertical), y el fenómeno de guiado de ondas producido en las escaleras y huecos de ascensores.

3.3.1.2.2.1.- Pérdidas por difracción

El programa también ofrece la posibilidad de contemplar las pérdidas por difracción debidas al paso de la señal por puntos próximos a los extremos de los muros.

Para ello, se ha utilizado un modelo basado en la recomendación ITU-R P.526-8, para el caso particular de difracción en obstáculos aislados de tipo agudos (o filo de cuchillo), ya que se ha considerado la hipótesis simplificadora de que las paredes se pueden asimilar a aristas de espesor despreciable.

Este modelo de difracción en obstáculos resulta aplicable a trayectos que, salvo esta obstrucción, son de visibilidad directa. Esta situación se representa en la figura 3.7, que servirá para ilustrar los pasos a seguir para el cálculo de las pérdidas por difracción que se describirá a continuación:

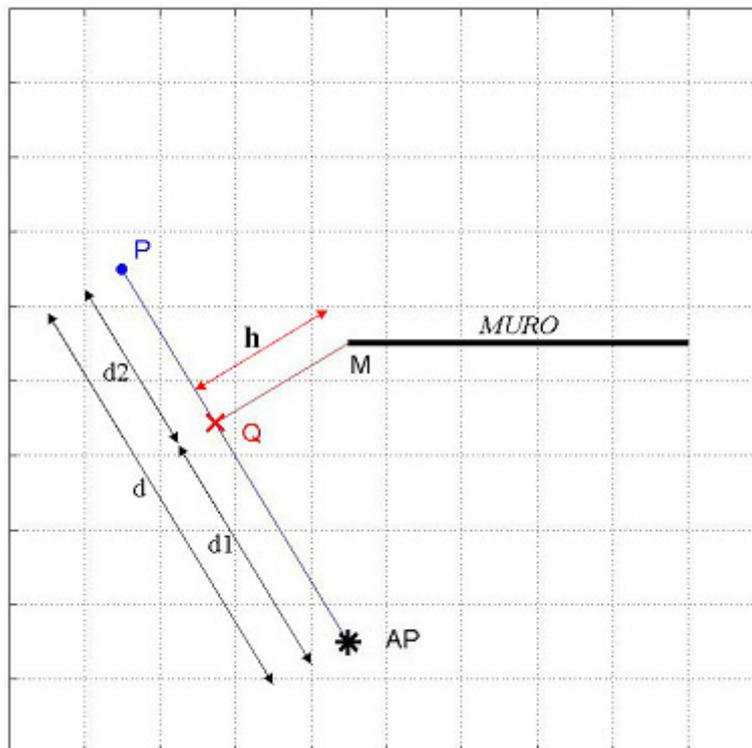


Figura 3.7: Esquema para el cálculo de pérdidas por difracción.

El cálculo de dichas pérdidas por difracción L_D se hará siguiendo la metodología de la citada recomendación, adaptándola al caso de un entorno de interior:

1. Selección de un punto P en el que se evaluarán las pérdidas por difracción. Dicho punto de prueba P debe tener visibilidad directa con el Punto de Acceso considerado.

2. Cálculo del despejamiento h , que se define como la distancia entre el extremo del muro (punto M , en la figura) y el punto Q (proyección de dicho extremo M sobre la recta que une el punto P con el Punto de Acceso). Por convenio, el despejamiento h se toma negativo (para el caso de visibilidad directa).

3. Cálculo del radio R_1 de la primera zona de Fresnel, según la siguiente fórmula:

$$R_1(m) = \sqrt{\frac{\lambda(m) \cdot d_1(m) \cdot d_2(m)}{d(m)}} = \sqrt{\frac{0,125 \cdot d_1(m) \cdot d_2(m)}{d(m)}} \quad (3.8)$$

4. Cálculo del parámetro adimensional v , definido como sigue:

$$v = h \cdot \left[\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} = 2,58 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\frac{f(\text{MHz}) \cdot d(\text{km})}{d_1(\text{km}) \cdot d_2(\text{km})}} \cdot h(m) \quad (3.9)$$

Este parámetro adimensional v se puede expresar como el despejamiento adimensional (h/R_1) multiplicado por la raíz de dos:

$$\begin{aligned} \frac{h(m)}{R_1(m)} &= \sqrt{\frac{d(m)}{\lambda(m) \cdot d_1(m) \cdot d_2(m)}} \cdot h(m) = \frac{1}{548} \sqrt{\frac{f(\text{MHz}) \cdot d(\text{km})}{d_1(\text{km}) \cdot d_2(\text{km})}} \cdot h(m) \\ \Rightarrow v &= \sqrt{2} \cdot \frac{h(m)}{R_1(m)} \end{aligned} \quad (3.10)$$

5. Si el parámetro adimensional v (del mismo signo que h) es menor o igual que $-0,7$ se considera que existe despejamiento suficiente, por lo que los obstáculos no introducen ninguna pérdida por difracción ($L_D = 0$ dB). En cambio, si el valor de v está comprendido entre $-0,7$ y 0 , el despejamiento es insuficiente, por lo que habría que añadir las pérdidas por difracción que se calcularían de la siguiente forma:

$$\text{Si } -0,7 < v < 0 \Rightarrow L_D(\text{dB}) = 6,9 + 20 \cdot \log\left(\sqrt{(v-0,1)^2 + 1} + v - 0,1\right) \quad (3.11)$$

Este proceso se repite para todos los posibles punto de prueba P que tengan visibilidad directa con cada uno de los Puntos de Acceso. Las pérdidas por difracción L_D así calculadas se añaden a las pérdidas dadas por el modelo de propagación *Cost Multi-Wall*, explicado en el apartado 3.3.1.2.2.

En la gráfica de la figura 3.8 se puede observar como para un valor de v menor que -0.7 se tienen pérdidas en un margen $[-1,1]$ dB, que podemos despreciar.

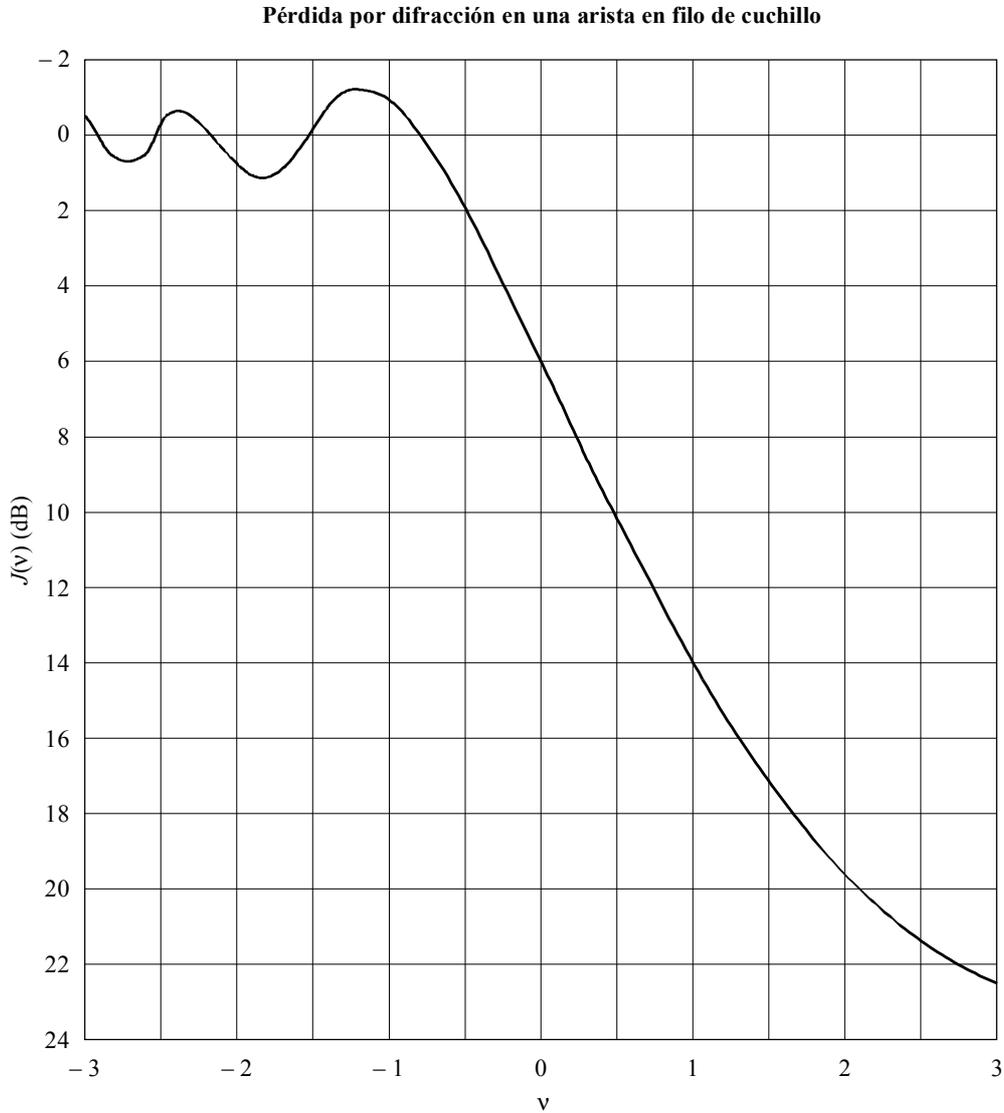


Figura 3.8: Pérdida por difracción en una arista en filo de cuchillo

Como resultado de la inclusión en el modelo de propagación de estas pérdidas por difracción debidas a obstáculos, ya no se produce una discontinuidad acentuada en el nivel de señal al pasar de un punto con visibilidad directa (desde el Punto de Acceso) a un punto cuya visibilidad queda obstaculizada por una pared, sino que el cambio en la potencia es progresivo.

3.3.2.- Modelos deterministas

Con 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, además de las pérdidas medias de propagación, la estadística de la señal, y otros parámetros propios de banda ancha, tales como la respuesta impulsional, los ángulos de llegada de las distintas contribuciones, etc.

Existen diversas técnicas de modelado determinista. Concretamente, en aplicaciones en interiores se han estudiado, sobre todo, dos tipos: las basadas en el cálculo FDTD (*Finite Difference Time Domain*), y las basadas en la Óptica Geométrica (GO). Se ha demostrado que estas últimas resultan computacionalmente más eficientes que la FDTD.

La aproximación de Óptica Geométrica solo es aplicable en aquellos casos en los que las dimensiones de los obstáculos que encuentre la señal sean mucho mayores que la longitud de onda. Las frecuencias utilizadas en entornos interiores permiten suponer tal aproximación.

Entre los métodos o procedimientos para obtener las distintas trayectorias de las contribuciones que alcanzan al receptor móvil puede citarse el Método de las Imágenes Virtuales y los Métodos basados en técnicas de Lanzado de Rayos, que se describirán a continuación.

3.3.2.1.- Método de las Imágenes Virtuales. Trazado de Rayos

Esta técnica de modelado consiste en calcular las imágenes del receptor con las paredes y suelos más importantes, normalmente los más cercanos, y posteriormente considerar las trayectorias desde el transmisor hasta cada una de las imágenes. El método dual (cálculo de las imágenes del transmisor, y las trayectorias hasta los receptores) también es válido.

Uno de los primeros trabajos en los que se usa esta técnica es [25].

Al tener calculados la posición del transmisor y la de las imágenes de los receptores (o viceversa), las trayectorias de los rayos ópticos que definen el frente de

ondas quedan perfectamente definidas, y pueden ser trazadas con exactitud. Por ello, muchas veces a esta técnica se le conoce como Trazado de Rayos (*Ray Tracing*). En el COST 231, a esta técnica se le ha puesto el nombre de IAM.

La potencia total recibida se puede obtener como la suma coherente de todas las contribuciones, teniendo en cuenta el retardo si se desea, además, caracterizar la respuesta impulsional del canal.

Este método resulta desaconsejable cuando el entorno se complica, y muy especialmente cuando se trata de considerar reflexiones en número superior a dos, ya que el tiempo de cálculo crece exponencialmente con el orden de las reflexiones.

El efecto del mobiliario puede tenerse en cuenta añadiendo ciertas pérdidas adicionales, en torno a 3dB. También conviene limitar las pérdidas de penetración de paredes cuando el ángulo de incidencia es muy pequeño. Un valor límite adecuado será, por ejemplo, el doble en dB del que tome con incidencia normal.

3.3.2.2.- Métodos de Lanzado de Rayos

Los métodos basados en el Lanzado de Rayos consisten básicamente en lanzar desde el transmisor un número finito pero suficiente de rayos, uniformemente en las distintas direcciones del espacio, cubriendo así el ángulo sólido completo. Para cada rayo lanzado se consideran las múltiples reflexiones y transmisiones que pueda experimentar hasta alcanzar al receptor.

El número de reflexiones o transmisiones a considerar dependerá del nivel de señal a partir del cual una contribución pueda ser considerada como poco significativa, o bien tras un número limitado de interacciones con los obstáculos.

Este método es muy útil en entornos complicados ya que permite un fácil seguimiento de las reflexiones. Sin embargo, resulta compleja la localización de los receptores debido a la dificultad de saber si un rayo alcanza o no un objeto puntual, ya que el número de rayos lanzados, mayor o menor, siempre es finito y de naturaleza unidimensional.

Para solucionar el problema de los objetos puntuales (receptores, elementos difractantes, *scatterers*, etc.) se suele recurrir a una esfera de incertidumbre alrededor de ellos. El radio de tal esfera (o círculo, en 2D) ha de ser dependiente de la distancia recorrida por el rayo, así como de la resolución angular con la que se lanzan los distintos rayos.

3.3.3.- Resumen

Dependiendo de las necesidades particulares que se tengan a la hora de planificar los sistemas de Comunicaciones Inalámbricas en interiores, se necesitará un tipo de modelo u otro. Así, si bastara simplemente con tener una idea aproximada de la potencia media recibida en una zona determinada, se podría acudir a sencillos modelos de pérdidas de propagación suficientemente contrastados, que, además, pueden tener en cuenta, en cierta medida, los efectos del entorno.

Sin embargo, en aquellos casos en que el sistema deba ser considerado como de banda ancha, se necesitará un modelo que tenga en cuenta tal circunstancia, ya sea de forma empírica a partir de medidas realizadas bajo condiciones similares a las de estudio, o de forma más determinista, intentando en lo posible simular el comportamiento de las ondas propagándose por el entorno.

Hoy en día los modelos de trazado de rayos están considerados entre los más precisos de entre los modelos de predicción de potencia de campo; sin embargo, requieren una representación muy detallada del área a analizar. La precisión del modelo depende en gran medida de la precisión y completitud/complejidad de la base de datos asociada a la representación. Por otro lado, el tiempo de computación depende en modo exponencial de estos detalles. Así, el tiempo de computación de un área reducida pero muy detallada puede ser mucho mayor que el de un área mayor pero con menor nivel de detalle.