

MODELOS DE PROPAGACIÓN EN INTERIORES

Capítulo
1

“La constancia es la virtud por la que todas las demás dan su fruto” -
Arturo Graff

Entorno	N
Edificios (condiciones de visión directa)	1.6 a 2
Edificios (sin visión directa)	2 a 4
Edificios (sin visión directa, separación de uno a tres pisos)	4 a 6

Tabla 1.1: Variable de pérdida de trayecto.

1.1. Modelos empíricos

1.1.1. Log-Normal Shadowing Path Loss Model

La mayor parte de los modelos empíricos se basan en el siguiente modelo según el cual, las pérdidas en entornos cerrados se pueden expresar según la [ecuación \(1.1\)](#) en función de la distancia entre transmisor y receptor como:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log(d/d_0) + X\sigma \quad (1.1)$$

donde:

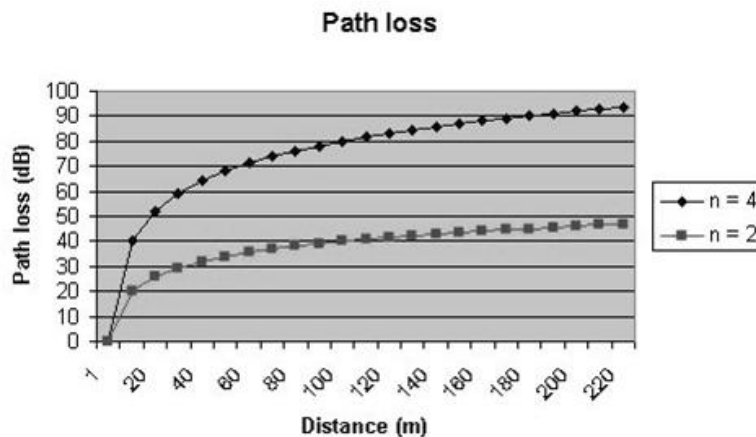
n : variable de pérdida de trayecto

$PL(d_0)$: pérdidas a distancia cercana de referencia

$X\sigma$: desviación típica

n es una variable de pérdida de trayecto que depende del tipo de entorno. La [Tabla 1.1](#) muestra los valores típico de n para diferentes entornos. $X\sigma$ es una variable aleatoria expresada en dB que indica una desviación típica de σ dB. $PL(d_0)$ se calcula utilizando el modelo de propagación en espacios abiertos o realizando medidas de campo.

La [Figura 1.1](#) muestra las curvas de pérdida de trayecto para diferentes valores de la variable de pérdida de trayecto (n)

Figura 1.1: Pérdidas de trayecto para diferentes valores de n .

Tipo de Pérdida	Descripción	Factor (dB)
L_f	Suelos (estructura típica) Baldosas, revestimiento de hormigón y espesor típico; 30cm	18.3
L_{w1}	Muros internos finos de yeso y muros con muchos huecos (ventanas)	3.4
L_{w2}	Muros internos (hormigón, ladrillos), mínimo número de huecos	6.9

Tabla 1.2: Valores medios de los factores de pérdida.

Este modelo es una técnica de estimación de pérdidas de propagación muy práctica y que tiene como principal ventaja que tiene en cuenta todos los factores que influyen en la propagación.

1.1.2. Modelo de Pérdida de Trayecto basado en COST231

Este es el modelo de propagación indoor utilizado en **UMTS**. Se ha recogido del *ETSI TR-101-112 ch. B.1.8* [ETSI], que es una especificación de los procedimientos seleccionados para la elección de las tecnologías de transmisión de radio para UMTS.

Descripción del modelo

El modelo viene definido por la siguiente ecuación:

$$L = L_{FS} + L_C + \Sigma K_{wi} L_{wi} + n^{((n+2)/(n+1)-b)} * L_f \quad (1.2)$$

Donde:

L_{FS} : pérdida en espacio libre entre transmisor y receptor

L_C : constante de pérdida

k_{wi} : número de paredes de tipo i penetradas

n : número de suelos penetrados

L_{wi} : pérdida debida a muro de tipo i

L_f : pérdida entre suelos adyacentes

b : parámetro empírico

NOTA: L_C se fija normalmente en 37 dB.

En la [Tabla 1.2](#) se muestran los valores medios de los factores de pérdida según su categoría.

El modelo COST 231 es un modelo empírico que tiene en cuenta las pérdidas de propagación en espacio abierto así como las pérdidas introducidas por las paredes, suelos y techos penetrados en el trayecto directo entre transmisor y receptor.

1.1.3. Modelo basado en el número de muros y suelos (simplificado)

Caracteriza la pérdida de trayecto en interior por un exponente fijo de 2 (como en el espacio libre) y unos factores de pérdida relacionados con el número de suelos y muros que atraviesa la línea recta entre emisor y receptor.

$$L = L_1 + 20 \log(r) + n_f a_f + n_w a_w \quad (1.3)$$

Donde:

r : distancia en metros en línea recta

L_1 : pérdida de referencia con $r = 1$ metro

a_f : atenuación por cada suelo que atraviesa

a_w : atenuación por cada muro que atraviesa

n_f : número de suelos que atraviesa

n_w : número de muros que atraviesa

1.1.4. Modelo ITU-R

Es similar a los dos anteriores pero sólo tiene en cuenta explícitamente el número de suelos. Las pérdidas en el mismo piso por atravesar muros, se incluyen implícitamente cambiando el exponente en la pérdida de trayecto.

$$L_T = L_1 + 20 \log(f[\text{MHz}]) + 10 \log(r[\text{m}]) + L_f n_f - 28 \quad (1.4)$$

1.1.5. Linear Path Attenuation Model

Para un transmisor y un receptor que se encuentran en la misma planta, Andelman propuso el " *Linear path attenuation model*". El path loss medido en dB se obtiene del path loss en espacio libre $[PL_{FS}]$ más un factor que es lineal del rango que experimentalmente se ha obtenido. La [ecuación \(1.5\)](#) es la utilizada.

$$PL(d) = PL_{FS} + ad \quad (1.5)$$

Donde a es el coeficiente de atenuación lineal y d es la distancia entre transmisor y receptor. En el caso de un ambiente de oficinas, el coeficiente a sería 0.47 dB/m.

Este modelo es bastante más simple que el modelo *Log-Normal Shadowing Path Loss*, y no tiene en consideración efectos de desvanecimiento. Sólo

toma en consideración la pérdida en espacio libre. Este modelo es susceptible de ser específico de sitio, esto es debido a que el valor de a varía de un entorno a otro y debe ser medido con precisión para poder demostrar los beneficios de este modelo.

1.1.6. Dual Slope-Model

Este modelo fue desarrollado por Feuerstein y Beyer. Ellos observaron que el *path loss* se comporta de diferentes maneras a distancias cercanas y a distancias largas. Para cuantificar este efecto, este modelo trabaja con dos modelos *path loss*, uno para distancias cortas y otro para largas. El primero tiene un rango corto y tiene su propio índice e decaimiento. El segundo es función del primero. Para diferenciar la utilización de ambos modelos se introduce la distancia de ruptura d_{BR} . Las fórmulas utilizadas son la ecuación (1.6) y ecuación (1.7).

$$PL_{DS1}(d) = 10n_1 \log(4\pi d/\lambda) - a_0 \quad (1.6)$$

$$PL_{DS2}(d) = PL_{DS1}(d_{BR}) + 10n_2 \log(d/d_{BR}) \quad (1.7)$$

Donde:

d_{BR} : distancia de ruptura.

λ : longitud de onda.

n_1 : exponente de *path loss* antes de d_{BR} (PL_{DS1}).

n_2 : exponente de *path loss* después de d_{BR} (PL_{DS2}).

a_0 : diferencia entre PL_{DS} y PL_{FS} a la distancia de 1m.

a_0 es causado por efectos en las ondas y varía entre 0 y 5 dB. En las regiones cercanas, n_1 se suele establecer a 2; y para las regiones lejanas n_2 se suele poner un valor de 6 o mayor. Este modelo se puede hacer más específico para un sitio, al poder introducir los valores n_1 y n_2 . Además la distancia de ruptura d_{BR} juega un papel muy importante y debe ser un valor que se conozca lo mejor posible y establecido en base a mediciones.

1.1.7. Keenan-Montley Model

Montley propuso un modelo que se basa tanto en la teoría, como en las medidas hechas en la práctica. Este modelo mide el *path loss* mediante la fuerza de la señal recibida y una distancia de referencia. La ecuación (1.8) es utilizada en este caso.

$$PL_{KM}(d) = PL_M + 10n \log(d) + k_F PL_{FS} \quad (1.8)$$

Donde:

PL_M : es el *path loss* medido a 1m.
 PL_{FS} : es el *path loss* en espacio libre;
 incluyendo pérdidas por penetración a través
 de suelos y techos.
 k_F : número de suelos/techos penetrados.

Este modelo depende tanto de la teoría como del *path loss* medido. El *path loss* medido es una buena forma de saber el comportamiento del modelo. Sin embargo, este modelo no puede ser utilizado para predecir el nivel de señal recibido, dado el requerimiento de medidas del *path loss* real.

1.1.8. Modelo de Particiones en el mismo piso

Para este modelo se requiere tener datos específicos del tipo de construcción de la que se requiera saber las pérdidas. Por lo que este modelo es muy poco general y se aplica a construcciones en específico, pues como se mencionó se requiere tener el conocimiento de las mediciones de las pérdidas hechas a estas construcciones.

Para este modelo se requiere tener datos específicos del tipo de construcción de la que se requiera saber las pérdidas. Por lo que este modelo es muy poco general. Este modelo sólo suma las pérdidas de las mediciones tomadas, y a través de esto logra dar el cálculo de las pérdidas en la construcción.

En la [Tabla 1.3](#) se pueden observar algunas de estas mediciones hechas para diferentes materiales y ubicaciones, se pueden ver las pérdidas generadas por estos materiales, además se puede observar la frecuencia a la que se realizaron las mediciones.

Como se ha mencionado, es necesario el conocimiento de las mediciones experimentales, obligando a este modelo a tener esos datos para su uso y cálculo. En la [Tabla 1.3](#) y [Tabla 1.4](#) se muestran algunas mediciones realizadas que ayudan a la existencia de este y otros modelos.

Es necesario generar bases de datos específicas para situaciones específicas con lo que también limitamos la utilización de aplicaciones, al poder obtener mediciones para determinadas frecuencias. La [Tabla 1.4](#) muestra algunas mediciones experimentales de las pérdidas en edificios y diversos materiales de mayor uso para un ambiente interior, además se pueden ver las frecuencias a las que se realizaron las mediciones.

1.1.9. Modelo de Ericsson de múltiple punto de ruptura

Este modelo también es dependiente de mediciones experimentales hechas en edificios de oficinas con múltiples pisos. Tiene cuatro puntos de ruptura

Tipo de Material	Pérdida en dB	Frecuencia
Metal	26	815MHz
Aluminio	20.4	815MHz
Aislamiento de hoja	3.9	815MHz
Bloques de concreto	13	1300MHz
Pérdidas por un piso	20-30	1300MHz
Pérdidas por un piso y una pared	40-50	1300MHz
Atenuación observada cuando el transmisor toma un ángulo recto en la esquina del corredor	10-15	1300MHz
Cubierta de metal-12tf2	4-7	1300MHz
Maquinaria ligera	4-7	1300MHz
Maquinaria en general	5-10	1300MHz
Maquinaria Pesada	10-12	1300MHz
Escaleras de caracol	5	1300MHz
Textil ligero	3-5	1300MHz
Textil pesado	8-11	1300MHz
Area de inspección metal defectuoso	3-12	1300MHz
Racks metálicos	4-9	1300MHz
Cajas vacías	3-6	1300MHz
Pared bloques de concreto	13-20	1300MHz
Ducto del techo	1-8	1300MHz
Caja de metal de 4m	10-12	1300MHz
Rack de almacenamiento con papeles	2-4	1300MHz
Rack de 2.5m con partes metálicas	4-6	1300MHz

Tabla 1.3: Mediciones experimentales para distintos tipos de edificios.

Tipo de Material	Pérdida en dB	Frecuencia
Aluminio (1/8 in)	47	9.6GHz
Aluminio (1/8 in)	46	28.8GHz
Aluminio (1/8 in)	53	57.6GHz
Pared de concreto	8-15	1300MHz
Piso de concreto	10	1300MHz
Zona Comercial	38	9.6GHz
Zona Comercial	51	28.8GHz
Zona Comercial	59	57.6GHz
Placa de madera comprimida seca	1	9.6GHz
Placa de madera comprimida seca	4	28.8GHz
Placa de madera comprimida seca	8	57.6GHz
Dos Placas de madera comprimida seca	4	9.6GHz
Dos Placas de madera comprimida seca	6	28.8GHz
Dos Placas de madera comprimida seca	14	57.6GHz
Placa de madera comprimida mojada	19	9.6GHz
Placa de madera comprimida mojada	46	28.8GHz
Placa de madera comprimida mojada	57	57.6GHz
Dos Placas de madera comprimida mojada	39	9.6GHz
Dos Placas de madera comprimida mojada	46	28.8GHz
Dos Placas de madera comprimida mojada	57	57.6GHz

Tabla 1.4: Mediciones experimentales para distintos tipos de edificios II.

y junto con esto considera un límite superior e inferior para las pérdidas por trayectoria.

Este modelo asume el hecho de una atenuación de 30dB a una distancia $d_0=1\text{m}$, la cual fue aproximada para una frecuencia de 900MHz con una ganancia unitaria para las antenas, al depender de este dato este modelo se ve limitado para uso en alguna aplicación con una banda de frecuencias diferente.

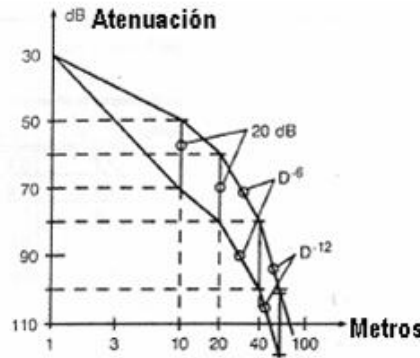


Figura 1.2: Modelo de pérdidas por trayectoria de Ericsson.

Este modelo incluye componentes por **shadowing** y es dependiente de la distancia como se puede ver en la [Figura 1.2](#), el modelo de Ericsson da un límite determinístico en las pérdidas por trayectoria en cierto rango de distancias.

Ericsson diseñó una distribución uniforme para generar los valores de las pérdidas por trayectoria dentro de los rangos máximos y mínimo como una función de la distancia, como ya se mencionó, para una simulación en interiores.

1.1.10. Modelo de pérdidas por particiones entre pisos

Al igual que el modelo de pérdidas por particiones en el mismo piso, este modelo basa en bases de datos recopiladas de mediciones experimentales tomadas en diferentes edificios.

Las pérdidas entre pisos están determinadas por las dimensiones y materiales de construcción externos del edificio. Es importante tener en cuenta todos los materiales de construcción del edificio para este modelo, ya que esto impacta a las pérdidas entre pisos. Se pueden ver en la [Tabla 1.5](#) los valores para el factor de atenuación entre pisos (FAF), estos datos experimentales fueron tomados de tres edificios en San Francisco. Por lo que sólo

Edificio	1900Mhz FAF(dB)	s(dB)	Número de Lugares
Primer Edificio			
Un Piso	31.3	4.6	110
Dos Pisos	38.5	4.0	29
Segundo Edificio			
Un Piso	26.2	10.5	21
Dos Pisos	33.4	9.9	21
Tres Pisos	35.2	5.9	20
Cuatro Pisos	38.4	3.4	20
Cinco Pisos	46.4	3.9	17
Tercer Edificio			
Un Piso	35.4	6.4	74
Dos Pisos	35.6	5.9	41
Tres Pisos	35.2	3.9	27

Tabla 1.5: Parámetro de pérdidas por FAF y desviación estándar.

son datos representativos de los datos que pueden llegar a obtenerse para diferentes edificios. Además puede notarse que el valor de *FAF* va aumentando y adicionándose a las pérdidas del primer piso conforme el número de pisos aumenta.

1.1.11. Modelo de Factor de Atenuación

Este modelo como su nombre lo indica, está basado en la atenuación existente entre pisos, por lo que en cierta forma comparte características con los anteriores, pero en este caso existe una ecuación matemática que calcula las pérdidas por trayectoria.

Este modelo da flexibilidad y muestra la reducción de la desviación estándar que se produce entre la pérdidas por trayectoria calculadas teóricamente y las pérdidas por trayectoria medidas.

El modelo de factor por atenuación viene dado por la [ecuación \(1.9\)](#).

$$PL(d)[dB] = PL(d_0) + 10n_{SF} \log(d/d_0) + FAF[dB] \quad (1.9)$$

Donde:

$PL(d_0)[dB]$ son pérdidas por trayectoria tomadas a una distancia de $d_0=1m$.

d es la distancia a la que se encuentra el transmisor del receptor en metros.

d_0 es el valor de la distancia en donde se encuentra el transmisor en metros.

n_{SF} representa el valor de la medición para el mismo piso. Para encontrar un buen valor de

	n	σ (dB)	Número de Localizaciones
EDIFICIOS			
LOCALIZACIONES	3.14	16.3	634
Mismo Piso	2.76	12.9	501
Pasando un Piso	4.19	5.1	73
Pasando dos pisos	5.04	6.5	30
Pasando por tres pisos	5.22	6.7	30
Tienda de dulces	1.81	5.2	89
Tienda de menudeo	2.18	8.7	137
Edificio de oficinas 1			
Edificio Completo	3.54	12.8	320
Mismo Piso	3.27	11.2	238
Ala oeste del quinto piso	2.68	8.1	104
Ala central del quinto piso	4.01	4.3	118
Ala oeste del cuarto piso	3.18	4.4	120
Edificio de oficinas 2			
Edificio Completo	4.33	13.3	100
Mismo Piso	3.25	5.2	37

Tabla 1.6: Mediciones para el exponente de pérdidas por trayectoria.

n es útil el uso de bases de datos de mediciones experimentales, y en este caso, se pueden tomar los datos de la [Tabla 1.6](#) que nos ayudan a ver ciertos valores para esta variable a partir de mediciones hechas en diversos edificios.

FAF es el factor de atenuación por piso.

Para conocer el valor de FAF es necesario también tener valores experimentales, por lo que las tablas [Tabla 1.5](#) y [Tabla 1.6](#) son útiles para este caso, aunque FAF puede ser reemplazado por un exponente que aún considera los efectos causados por los múltiples pisos y su separación.

La [ecuación \(1.9\)](#) puede modificarse hasta llegar a ser la [ecuación \(1.10\)](#)

$$PL(d)[dB] = PL(d_0) + 10n_{MF} \log(d/d_0) \quad (1.10)$$

Donde:

n_{MF} es el exponente de las pérdidas por trayectoria basado en las mediciones por múltiples pisos.

La [Tabla 1.6](#) muestra cómo la desviación estándar de las mediciones comparadas va decreciendo conforme el número de localizaciones se vuelve más pequeño y el sitio más específico.

A partir de estas mediciones se encontró que las pérdidas dentro de construcciones pueden ser representadas como la suma de las pérdidas por el espacio libre y las pérdidas por un factor de atenuación por los pisos que incrementa exponencialmente con la distancia como se en la [Tabla 1.6](#).

Localización	Frecuencia	α -Atenuación(dB/m)
Edificio 1:4	850MHz	0.62
	1.7GHz	0.57
	4.0GHz	0.47
Edificio 2:2	850MHz	0.48
	1.7GHz	0.35
	4.0GHz	0.23

Tabla 1.7: Diferentes valores para factor de atenuación α .

La [ecuación \(1.11\)](#) está basada en los trabajos realizados por *Devasirvatham*, a partir de mediciones en edificios multi-pisos, es posible modificar la [ecuación \(1.10\)](#) por dicha ecuación ([ecuación \(1.11\)](#)).

$$PL(d)[dB] = PL(d_0)[dB] + 20 \log(d/d_0) + \alpha d + FAF[dB] \quad (1.11)$$

A la [ecuación \(1.10\)](#) se le aumenta el factor α que es escalado por la distancia, hasta llegar a la [ecuación \(1.11\)](#). El valor de α puede ser tomado de la [Tabla 1.7](#).

1.2. Modelos Teóricos

Se basan en principios fundamentales de la física en cuanto a propagación de ondas de radio y los fenómenos que la rodean. Pueden ser aplicados en diferentes entornos sin afectarles a su precisión. En la práctica su implementación requiere enormes bases de datos de característica relativas al entorno, las cuales son imposibles o inviables de obtener de manera práctica.

los algoritmos usados por los modelos deterministas 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 comparados con los modelos empíricos.

En la actualidad existen diferentes modelos teóricos siendo los más populares los basados en *Ray-tracing* y *FTDTD*(Finite-Difference Time-Domain).

1.2.1. Modelos basados en Ray-Tracing

El algoritmo de *Ray-Tracing* calcula todos los posibles caminos desde el transmisor al receptor. En los modelos básicos de Ray-Tracing, la predicción

se basa en cálculos de transmisión en espacio abierto complementados con el efecto de reflexión de las paredes, teniendo en cuenta una única reflexión. Los algoritmos de Ray-Tracing más complejos incluyen mecanismos de difracción, dispersión difusa y penetración a través de diversos materiales.

En conclusión, el nivel de señal en un punto determinado se obtiene mediante la suma de los componentes de todos los caminos posibles existentes entre transmisor y receptor. Además de las pérdidas de propagación, en estos modelos se pueden predecir de manera fiable la dispersión en el tiempo de la señal.

Hoy en día, los modelos de *Ray-tracing* 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 que el de un área mayor pero con menor nivel de detalle.

1.2.2. Modelos FDTD

Las características de la propagación de radio se pueden derivar resolviendo directamente las ecuaciones de Maxwell relativas a propagación de ondas electromagnéticas.

El método *FDTD* (*Finite-Difference Time-Domain*) es probablemente el método más utilizado para la obtención de una solución numérica de las ecuaciones de Maxwell. En este método las ecuaciones de Maxwell se aproximan por medio de un conjunto finito de ecuaciones diferenciales. Antes de realizar los cálculos es necesario definir una cuadrícula específica (regular o irregular) sobre el área de interés. Una vez que estas condiciones iniciales han sido definidas, el algoritmo *FDTD* emplea las diferencias centrales para aproximar las derivadas tanto en el espacio como en el tiempo. En los nodos de la cuadrícula la solución se determina iterativamente, resolviéndose de este modo las ecuaciones de Maxwell directamente.

Al igual que los modelos basados en *Ray-tracing*, los modelos *FDTD* son muy exigentes computacionalmente. El tiempo de computación depende proporcionalmente del tamaño del área a ser analizada, pero no significativamente de los detalles incluidos en su descripción. Sin embargo, el número de nodos de la cuadrícula está exponencialmente relacionado al tamaño del área y la frecuencia de operación.

La precisión del modelo *FDTD* es comparable a la de los modelos basados en *Ray-tracing*; y la predicción es tan precisa como pueda serlo la base de datos de descripción del área.

Debido a su complejidad computacional, los modelos *FDTD* son aconsejables sólo en tareas de predicción de campo en pequeñas. Para áreas de mayor tamaño los modelos de *Ray-tracing* son más aconsejables.