

---

# CAPÍTULO 4

## MODELOS DE PROPAGACIÓN PARA INTERIORES

---

### 4.1 Pérdidas por Penetración en Construcciones.

Existen una gran cantidad de definiciones para las pérdidas por penetración en edificios, una de las más acertadas menciona que estas pérdidas (*building penetration loss*) son la diferencia entre el promedio de la señal medida en el edificio a nivel del suelo con el promedio de la señal sobre el piso de interés.

---

Las características de propagación para sistemas de comunicación dentro de construcciones son muy peculiares y por lo tanto de gran interés en el mundo de la investigación de propagación de RF, pero en la actualidad la tendencia de investigación está enfocada hacia la telefonía móvil celular.

Los resultados obtenidos para edificios aparentemente parecidos varían enormemente por factores de material, los cuales pueden ser tan triviales como la cantidad de vidrio en sus paredes exteriores, los diferentes niveles en los cuales están divididos los pisos, así como la altura de cada piso en particular, en conjunto con el material utilizado para la fabricación de las paredes.

Para lograr un mejor entendimiento de las pérdidas que puede haber por penetración o por la obstrucción de las construcciones se estudió la perspectiva del canal móvil satelital para llegar a tener un mejor entendimiento de éste.

Para la propagación en interiores nuevos desafíos surgen y los modelos de propagación mejoran junto con los instrumentos de simulación que se requieren para lograr predicciones seguras, exactas y computacionalmente eficientes y junto con esto se intentan vencer muchas de las pérdidas en la propagación de RF en interiores. Los desafíos frente al desarrollo de instrumentos de simulación para propagación de RF para interiores podrían llegar a ser:

- Las predicciones para Propagación dependen principalmente de parámetros de la construcción del edificio que a menudo no están disponibles, algunos de estos parámetros son el espesor de pared, los materiales, y las estructuras interiores del edificio.

---

- El uso Exclusivo de modelos de propagación para el trazado de la señal puede ser inadecuado. La señal que se simula a menudo encuentra muchos obstáculos provocando la existencia de reflexión y multitrayectoria y la falta del conocimiento de los coeficientes de difracción para muchas estructuras interiores, esto podría consumir demasiado tiempo provocando que sea computacionalmente ineficiente.

#### **4.2 Propagación dentro de Construcciones o en un ambiente interior.**

Para estudiar la propagación de una ambiente interior, se pueden considerar configuraciones de los lugares donde se realiza la comunicación y configuraciones de las zonas de cobertura donde se proporcionan los servicios de la red y de esta forma poder caracterizar físicamente el ambiente que puede variar con respecto a la utilización del mismo (oficina, casa, museo, etc.).

La condición de no tener línea de vista provoca mayores problemas que la de tenerla, así como la determinación de la capacidad de los canales y la calidad de los enlaces. En el caso de una ambiente interior, ambas condiciones existen, independientemente de que las señales recorran distancias muy cortas, esto es debido a la gran cantidad de obstáculos presentes en el ambiente, como ya se había mencionado.

El tamaño de los posibles lugares es diverso, desde pequeño hasta grande, y la densidad de obstáculos varía desde baja hasta alta. Estas configuraciones de las áreas de trabajo se encuentran resumidas en la Tabla 4.1 [4].

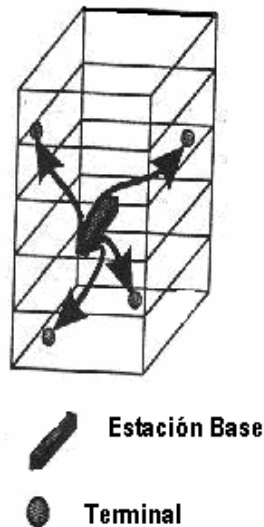
<i>Configuración</i>	<i>Tamaño del Lugar</i>	<i>Densidad de los obstáculos</i>
1	Grande sin particiones	Baja
2	Grande con particiones suaves	Baja a media
3	Grande sin particiones	Alta
4	Pequeño	Baja
5	Pequeño	Alta

**Tabla 4.1 Configuración de tamaño de Lugar y densidad de obstáculos [4].**

La configuración de las zonas de cobertura se divide en seis casos donde la división obedece al tipo de enlace de comunicación entre las terminales y la estación base (BS) o repetidor, según sea la implementación con la que se cuente o se haya instalado. Esta es una lista con los seis posibles casos [4].

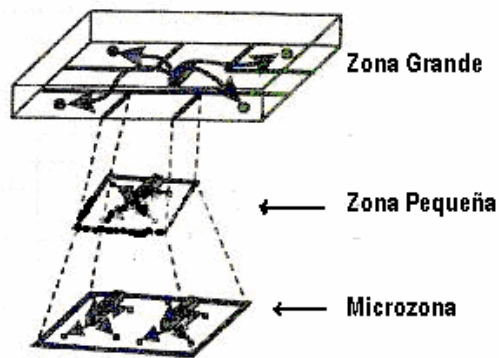
1. Zona Extragrande.
2. Zona Grande.
3. Zona Mediana.
4. Zona Pequeña.
5. Microzona.
6. Sistema Distribuido.

La radio propagación de interiores es dominada por los mismos mecanismos que la de exteriores, estos son reflexión, refracción y dispersión. Sin embargo, las condiciones varían mucho más en función de diferentes factores físicos que involucran tanto el diseño de los edificios, como su altura y los materiales con los que son construidos.



**4.1 Configuración de Zona Grande [4].**

Las Figuras 4.1 y 4.2 ejemplifican dos distintas configuraciones de cobertura para interiores con la existencia de antenas en la zona determinada para que se lleve a cabo la cobertura para interiores.



**4.2 Configuración de zonas por cobertura [4].**

. En general los canales de propagación de interiores (*indoor channels*) pueden ser clasificados en dos tipos:

- Línea de Vista (LOS)
- Línea de Vista con Obstrucciones (OBS).

---

A continuación se describen algunos de los modelos que se han tomado como base para realizar las nuevas investigaciones con lo que se pueden llevar acabo múltiples derivaciones de modo matemático o empírico dependiendo del grado de eficiencia que se quiera alcanzar, se ha aprendido que la actual tendencia en el modelado de propagación de interiores en forma práctica se hace mediante mediciones en el área donde se desea la cobertura para con esas mediciones realizar una simulación y estimar la correcta cobertura.

#### **4.3 Descripción de los tipos de modelos de propagación para interiores**

En los últimos años se han desarrollado diferentes modelos de predicción de propagación para ambientes interiores, en frecuencias que van de los 500Mhz a los 5Ghz. Cada uno de estos modelos tiene sus ventajas y sus desventajas que serán explicadas en este capítulo [19].

Últimamente varias compañías de telefonía móvil han comenzado con la investigación en este campo de propagación en interiores, el segundo grupo interesado en esto son las compañías de redes inalámbricas de computadoras (WLAN) enfocadas a redes para interiores [19].

Debido a la enorme demanda en planeación de redes en interiores, diferentes compañías han buscado el desarrollo de sus propios modelos y descripciones para este tipo de ambientes.

Los modelos de propagación para interiores se pueden subdividir en los cinco grupos que a continuación se detallan.

- **Modelos Electromagnéticos** Las características de radio de la propagación de los modelos electromagnéticos se pueden derivar solucionando directamente las ecuaciones de Maxwell para la propagación de la onda electromagnética. El método del Tiempo-Dominio de la diferencia finita (FDTD) es probablemente el método más popular para una solución numérica de las ecuaciones de Maxwell. En este método, las ecuaciones de Maxwell son aproximadas por un sistema de ecuaciones de la diferencia finita. Los modelos de FDTD exigen procesos de cálculos de cómputo complicados y tardados para procesar. Los modelos electromagnéticos son extremadamente complejos y difíciles de calcular puesto que cada característica física de la propagación debe ser considerada [19].
- **Modelos estadísticos** este tipo de modelos no necesitan información acerca de las paredes en las construcciones. Lo único que se requiere para los cálculos en estos modelos es una descripción del tipo de construcción, por lo cual con saber si se propagan las señales en una oficina, un hotel, un hospital, un edificio viejo, una casa, estos modelos pueden dar resultados [19].
- **Modelos empíricos de trayectoria directa** este tipo de modelos está basando en la trayectoria directa existente entre el transmisor y el receptor, rayos futuros no son considerados en este tipo de modelos. Estos modelos son en gran parte la base para el diseño y caracterización de los últimos modelos desarrollados.
- **Modelos empíricos de multi-trayectoria** Este tipo de modelos principalmente se sostiene en cálculos necesariamente realizados por computadoras, por lo que diferentes tipos de trayectorias son calculadas y almacenadas en las computadoras, con estos datos se obtiene una predicción de las pérdidas en interiores [19].

- **Modelos de Rayo Óptico** este tipo de modelos está enfocado a las bandas de frecuencias de UHF, las cuales pueden ser descritas con modelos de propagación quasi-ópticos que consideran la reflexión con las paredes y la difracción con las esquinas. Este tipo de modelos principalmente está basado en algoritmos creados para aplicaciones particulares [19].

Cada uno de estos grupos contiene diferentes implementaciones de la idea básica de pérdidas por trayectoria en forma general, pero los modelos que pertenecen al mismo grupo presentan resultados parecidos entre sí, y con esto tienen las mismas ventajas y desventajas.

#### **4.3.1 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 menciono se requiere tener el conocimiento de las mediciones de las pérdidas hechas a estas construcciones. 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 [1].

En la Tabla 4.2 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.



<b>Tipo de Material</b>	<b>Pérdida en dB</b>	<b>Frecuencia</b>
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-12ft <sup>2</sup>	4-7	1300Mhz
Maquinaria ligera	1-4	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 en donde los obreros inspeccionan el metal defectuoso	3-12	1300Mhz
Racks metálicos	4-9	1300Mhz
Cajas vacías de inventario	3-6	1300Mhz
Pared bloques de concreto	13-20	1300Mhz
Ducto del el 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 metalicas	4-6	1300Mhz

**Tabla 4.2 Mediciones experimentales para distintos tipos de edificios [22]**

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 las Tablas 4.2 y 4.3 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 4.3 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.

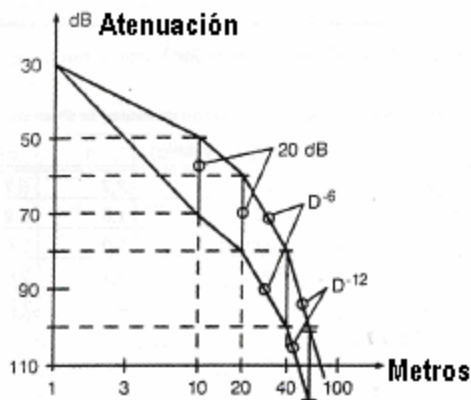
<b>Tipo de Material</b>	<b>Pérdidas en dB</b>	<b>Frecuencia</b>
Aluminio (1/8 in)	47	9.6Ghz
Aluminio(1/8 in)	46	28.8Ghz
Aluminio(1/8 in)	53	57.6Ghz
Pared de Concreto	8-15	1300Mhz
Piso de concreto	10	1300Mhz
Zona Comercial	38	9.6Ghz
Zona Comercial	51	28.8Ghz
Zona Comercial	59	57.6Ghz
Placa de madera comprimida 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	28.8 Ghz
Placa de madera comprimida mojada	57	57.6 Ghz
Dos Placas de madera comprimida mojada	39	9.6 Ghz
Dos Placas de madera comprimida mojada	46	28.8 Ghz
Dos Placas de madera comprimida mojada	57	57.6Ghz

**Tabla 4.3 Mediciones experimentales para distintos tipos de edificios [22]**

#### **4.3.2 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 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 [1].



**Figura 4.3 Modelo de pérdidas por trayectoria de Ericsson[1].**

Este modelo incluye componentes por *shadowing* y es dependiente de la distancia como se puede ver en la Figura 4.3, 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].

#### **4.3.3 Modelo de pérdidas por particiones entre pisos.**

Al igual que el modelo de pérdidas por particiones en el mismo piso, este modelo se 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 tomar 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 4.3 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 son datos representativos de los datos que pueden llegar a obtenerse para diferentes edificios [1].

Puede notarse en la tabla 4.4 que el valor de *FAF* va aumentando y adicionándose a las pérdidas del primer piso conforme el número de pisos aumenta.

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

Tabla 4.4 Parámetros de pérdidas por FAF y desviación estándar [22].

#### 4.3.4 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 las pérdidas por trayectoria calculadas teóricamente y las pérdidas por trayectoria medidas. El modelo de factor por atenuación está dado por la ecuación 4.1.

$$PL(d)[dB] = PL(d_0) + 10n_{SF} \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + FAF[dB] \quad (4.1)$$

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  $n$  es útil el uso de bases de datos de mediciones experimentales, y en este caso se pueden tomar los datos de las tablas 4.4 y 4.7 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 4.4 y 4.8 son útiles para este caso, aunque  $FAF$  puede ser remplazado por un exponente que aún considera los efectos causados por los múltiples pisos y su separación. La ecuación 4.1 puede modificarse hasta llegar a ser la ecuación 4.2.

$$PL(d)[dB] = PL(d_0) + 10n_{MF} \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (4.2)$$

Donde

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

	$n$	$\sigma$ (dB)	Número de Locaciones
<b>EDIFICIOS</b>			
<b>LOCACIONES</b>	3.14	16.3	634
<b>MISMO PISO</b>	2.76	12.9	501
<b>PASANDO UN PISO</b>	4.19	5.1	73
<b>PASANDO DOS PISOS</b>	5.04	6.5	30
<b>PASANDO POR TRES PISOS</b>	5.22	6.7	30
<b>TIENDA DE DULCES</b>	1.81	5.2	89
<b>TIENDA DE MENUDEO</b>	2.18	8.7	137
<b>EDIFICIO DE OFICINAS 1</b>			
<b>EDIFICIO COMPLETO</b>	3.54	12.8	320
<b>MISMO PISO</b>	3.27	11.2	238
<b>ALA OESTE DEL QUINTO PISO</b>	2.68	8.1	104
<b>ALA CENTRAL DEL QUINTO PISO</b>	4.01	4.3	118
<b>ALA OESTE DEL CUARTO PISO</b>	3.18	4.4	120
<b>EDIFICIO DE OFICINAS 2</b>			
<b>EDIFICIO COMPLETO</b>	4.33	13.3	100
<b>MISMO PISO</b>	3.25	5.2	37

Tabla 4.5 Mediciones para el exponente de pérdidas por trayectoria [1].

La tabla 4.5 muestra cómo la desviación estándar de las mediciones comparadas va decreciendo conforme el número de locaciones 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 ve en la tabla 4.5.

La ecuación 4.3 está basada en los trabajos realizados por Devasirvatham, a partir de mediciones en edificios multi-pisos, es posible modificar la ecuación 4.2 por la ecuación 4.3.

$$PL(d)[dB] = PL(d_0)[dB] + 20 \log \left( \frac{d}{d_0} \right) + \mathbf{a}d + FAF[dB] \quad (4.3)$$

A la ecuación 4.2 se le aumenta el factor  $\mathbf{a}$  que es escalado por la distancia, hasta llegar a la ecuación 4.3. El valor de  $\mathbf{a}$  puede ser tomado de la tabla 4.6 [1].

Locación	Frecuencia	$\mathbf{a}$ – Atenuación (dB/m)
Edificio 1: 4	850 Mhz	0.62
	1.7 Ghz	0.57
	4.0 Ghz	0.47
Edificio 2 : 2	850 Mhz	0.48
	1.7 Ghz	0.35
	4.0 Ghz	0.23

Tabla 4.6 Diferentes valores para factor de atenuación  $\mathbf{a}$  [22].

#### 4.3.5 Modelo de pendiente Dual.

Feuerstein y Beyer desarrollaron este modelo. Ellos observaron que las pérdidas por trayectoria se comportan distinto en rangos cortos y en rangos distantes. Para tomar en cuenta este efecto el Modelo *Dual Slope* o de pendiente dual tiene dos modelos de pérdidas por trayectoria para rangos cortos de distancia y otro para rangos largos de distancia. La ecuación 4.4, que tome en cuenta la primera distancia, nos muestra la pérdida por trayectoria para un rango corto y para su propia atenuación de potencia. La ecuación 4.5 muestra la segunda pérdida por trayectoria que es función de la pérdida por trayectoria de rango corto, para hacer la diferencia entre las dos distancias que se clasifican como rango

corto y rango largo, se tiene el parámetro de distancia punto de ruptura entre las dos distancias  $d_{BR}$  que se puede ver en la ecuación 4.5[15].

$$PL_{DS1}(d) = 10 n_2 \text{ Log } \frac{4\pi d}{I} - a_0 \quad (4.4)$$

$$PL_{DS2}(d) = 10 n_1 \text{ Log } \frac{d}{d_{BR}} \quad (4.5)$$

Donde:

$d_{BR}$  es la distancia en metros del punto de ruptura entre las dos distancias (rango largo y corto) estas son determinadas por el ambiente en específico.

$n_1$  es la potencia en Watts que se pierde antes del punto de ruptura

$n_2$  es la potencia en Watts que se pierde después del punto de ruptura

$a_0$  es la diferencia entre  $PL_{DS}$  y las pérdidas en el espacio libre,  $PL_{FS}$  a una distancia de 1m ( $d=1m$ ).

La variable  $a_0$  es causada por efectos de la onda guiada y varía entre los 5dB y los 0dB. En la región de pérdidas dada por la variable  $n_1$  se convierte en  $n_2$ . En la región lejana la zona de pérdidas llega a conjuntarse con la  $n_2$  teniendo un valor de 6. Este modelo tiene más sitios específicos con la introducción de variables  $n_1$  y  $n_2$ . El punto de ruptura juega un papel importante en este modelo ya que da la división entre las dos regiones, el punto de ruptura debe saberse con un alto grado de precisión y puede ser hallado con mediciones.



#### 4.3.6 Modelo Multi-pared /COST-231.

Este modelo está especialmente diseñado para propagación en interiores. Toma en cuenta las pérdidas por espacio libre y las pérdidas por los pisos penetrados por trayectoria directa que existe entre el transmisor y el receptor.

Este modelo llamado Modelo Multi-pared/COST-231 es un modelo empírico para pérdidas en paredes [European Comisión, 1999; Lott, 2001]. Como se ha mencionado este modelo da una pérdida por el espacio libre en conjunto con la pérdida que se incluye al pasar la señal por diferentes paredes y pisos, al ser penetrados por la señal electromagnética transmitida en la trayectoria directa desde el transmisor hacia el receptor. El modelo COST-231 para pérdidas por trayectoria en interiores está dado por la siguiente ecuación en decibels [15].

$$PL = PL_{FS} + L_C + \sum k_{WI} L_{WI} + L_F n^{\frac{n+2}{n+1-b}} \quad (4.6)$$

Donde:

$PL_{FS}$  es la pérdida en decibels en el espacio libre entre el transmisor y el receptor

$L_C$  es la constante de pérdida en decibels

$K_{WI}$  es el número de paredes penetradas de un tipo  $i$

$n$  es el número de pisos penetrados

$L_{WI}$  son las pérdidas por el tipo de pared  $i$

$L_F$  son las pérdidas por pisos adyacentes



---

$B$  es un parámetro medido empíricamente

Por lo regular las mediciones se basan en el tipo de construcción que se esté analizando para este modelo se han hecho más mediciones en oficinas por lo que se toman parámetros promedio y se utilizan en la ecuación para aplicarla al caso específico de oficinas.

Para la ecuación 4.7 se toma en cuenta un ambiente de oficina, con un valor de  $n=4$ . para cálculos en ambientes moderadamente pesimistas se puede tomar un valor de  $n=3$ , con lo que la ecuación se modifica, si además de esto damos valores usados regularmente como  $L_C=37dB$ ,  $L_F=18.3$ ,  $b=0.46$  este modelo puede simplificarse de manera significativa [15].

$$PL(d) = 37 + 30 \text{ Log}(d) + 18.3 n^{\frac{n+2}{n+1}-0.46} \quad (4.7)$$

La ecuación puede ser simplificada aun más si se toma en cuenta que no existe penetración en paredes, asumiendo esto el tercer termino de la ecuación 4.7 puede ser eliminado, quedando una ecuación como la siguiente [15].

$$PL(d) = 37 + 30 \text{ Log}(d) \quad (4.8)$$

Como se puede notar, esta ecuación es bastante simple por lo que sólo es una simplificación para un caso específico, otro aspecto importante a notar es que esta ecuación es la misma que la ecuación de un modelo de pérdidas básico.

Para obtener buenos resultados en este modelo y mejorar la exactitud del mismo el exponente de pérdidas por trayectoria y las pérdidas entre los diferentes pisos y paredes deben ser tomadas de mediciones experimentales.

---

#### 4.3.7 Modelo Keenan-Montley

Este modelo que lleva el nombre de su creador Montley (1988) es un modelo con mejoras en las pérdidas por trayectoria, está basado en dos partes importantes: la teoría y las mediciones reales [15].

Este modelo mejorado calibra el modelo de pérdidas por trayectoria con la fuerza de la señal recibida, con relación también a la distancia entre el transmisor y el receptor.

La ecuación que describe este modelo, dado en decibeles, es la siguiente.

$$PL(d) = PL_M + 10 n \text{ Log } (d) + K_F PL_{FS} \quad (4.9)$$

Donde:

$PL_M$  son las pérdidas por trayectoria reales medidas a 1m

$PL_{FS}$  son las pérdidas en el espacio libre que también incluyen las pérdidas por penetración en los pisos

$k_F$  es el número de pisos penetrados

Como se mencionó este modelo es característico pues toma en cuenta la parte teórica y a su vez la parte real que se da por las mediciones experimentales de pérdidas por trayectoria. Estas mediciones son buenas para tener un buen ajuste a este modelo.

Una de las principales restricciones para este modelo es que no puede ser usado para un sistema que prediga la RSL dados los requerimientos de un sistema real de medidas para pérdidas por trayectoria [1].

---

#### 4.3.8 Modelo de atenuación lineal por trayectoria.

Este modelo es realmente sencillo en cuanto a su parte de aplicación teórica, pues la parte real de mediciones por pérdidas por trayectoria tiene un gran peso en este modelo. Andelman (2004) lo propuso como un modelo a utilizarse cuando el transmisor y el receptor se encuentran en el mismo piso [15].

Este modelo de pérdidas por trayectoria lineal toma en cuenta trayectorias para interiores en decibels a partir de la potencia radiada, estas pérdidas están dadas por las pérdidas en el modelo del espacio libre que es la parte teórica de este modelo, más el factor lineal con cierto rango, este factor se obtiene experimentalmente.

La ecuación que describe las pérdidas por trayectoria para este modelo es la siguiente.

$$PL(d) = PL_{FS} + (a)(d) \quad (4.10)$$

Donde:

$PL_{FS}$  son las pérdidas por el espacio libre.

$a$  es el coeficiente de atenuación lineal

$d$  es la distancia entre el transmisor y el receptor.

Para tener una mejor idea de este modelo podemos plantear el hecho de la existencia de un ambiente de oficina, el coeficiente de atenuación de pérdidas por trayectoria es ,  $a=0.47$  (dB/m), este modelo es una versión mucho más simplificada del *Shadowing path loss model* y no toma en cuenta los efectos propios de la atenuación a gran escala, como normalmente serían tomados en cuenta para un modelo de espacios abiertos [15].

Es importante recalcar que este modelo es totalmente específico para ambientes específicos, esto se puede ver al tener el factor de  $a$  que es una variable dependiente de la experimentación, por lo cual varía de ambiente a ambiente. Esta variable debe ser medida precisamente para demostrar el buen funcionamiento de este modelo.

#### 4.3.10 Modelo de pérdidas de trayectoria por ensombramiento.

En un ambiente real de propagación interior existen un sin número de efectos que provocan cambios en el ambiente. Una lenta atenuación ocurre cuando la señal es recibida y cuando no se tienen cambios significativos en la distancia en pocas longitudes de onda en contraste con la atenuación rápida.

<b>Edificio</b>	<i>Frecuencia</i>	<i>n</i>	<i>s(dB)</i>
Tiendas de menudeo	914 Mhz	2.2	8.7
Tiendas de dulces	914 Mhz	1.8	5.2
Oficina, particiones duras	1500 Mhz	3.0	7.0
Oficina, particiones suaves	900 Mhz	2.4	9.6
Oficina, particiones suaves	1900Mhz	2.6	14.1
<b>Fabricas con LOS*</b>	<i>Frecuencia</i>	<i>n</i>	<i>s(dB)</i>
Textileras/ Quimica	1300 Mhz	2.0	3.0
Textileras/ Quimica	4000Mhz	2.1	7.0
Papelera/cereales	1300	1.8	6.0
Metalurgica	1300	1.6	5.8
<b>Fabricas con OBS</b>	<i>Frecuencia</i>	<i>n</i>	<i>s(dB)</i>
Textileras/ Quimica	4000Mhz	2.1	9.7
Metalurgica	1300 Mhz	3.3	6.8

**Tabla 4.7 Mediciones para el exponente de pérdidas por trayectoria[1].**

La tabla 4.7 muestra distintos valores para  $n$  y para  $X_s$  que pueden ser utilizados en la ecuación 4.11 que describe este modelo.

$$PL(d) = PL_{FS} + 10n \log \left[ \frac{d}{d_0} \right] + X_s \quad (4.11)$$

Donde:

$PL_{FS}$  son las pérdidas por el espacio libre.

$n$  es un valor dependiente de las mediciones experimentales.

$X_s$  es la desviación estándar del promedio de la atenuación por piso

Los efectos de atenuación son modelados como una componente adicional, que tiene que ver con la desviación estándar del promedio de la atenuación por piso, esta componente adicional se suma a las pérdidas por trayectoria y es representada como  $X_s$ . La tabla 4.8 muestra datos de mediciones experimentales que pueden ser usados para ese modelo.

Edificio	FAF(dB)	s(dB)	Número de locaciones
<i>Edificio en oficinas 1</i>			
Pasando un piso	12.9	7.0	52
Pasando dos pisos	18.7	2.8	9
Pasando tres pisos	24.4	1.7	9
Pasando cuatro pisos	27	1.5	9
<i>Edificio en oficinas 2</i>			
Pasando un piso	16.2	2.9	21
Pasando dos pisos	27.5	5.4	21
Pasando tres pisos	31.6	7.2	21

Tabla 4.8 Diferentes valores para parámetro FAF y desviación estándar [1].

#### 4.3.11 Modelo ITU-R.

Este modelo está planteado por la ITU para propagación en interiores, es más estable debido a la utilización de variables que pueden conocerse sin necesidad de mediciones, con lo que puede determinarse en parte que este modelo es mitad teórico y mitad experimental.

$$L_T = 20 \log f_c + 10 n \log r + L_f(n_f) - 28 \quad (4.12)$$



Donde:

$f_c$  es la frecuencia de transmisión en Ghz

$n$  es el factor de pérdidas por atenuación exponencial

$r$  es la distancia en metros dentro del edificio entre el transmisor y el receptor.

$L_f(n_f)$  es el factor de pérdidas por penetración en pisos

En este modelo las paredes no son tomadas en cuenta de manera explícita y como se ha mencionado en otros modelos, el factor de pérdidas por atenuación exponencial ( $n$ ) depende de la frecuencia de utilización y del ambiente en el que propaga la señal.

<i>Frecuencia</i>	<b>Tipo de ambiente</b>		
	<i>Residencial</i>	<i>Oficina</i>	<i>Comercial</i>
0.9 Ghz	-----	3.3	2.0
1.2-1.3 Ghz	-----	3.2	2.2
1.8-2.0 Ghz	2.8	3.0	2.2
4.0 Ghz	-----	2.8	2.2
60.0 Ghz	-----	2.2	1.7

**Tabla 4.9** Diferentes valores para el exponente de pérdidas por trayectoria [8]

La ecuación 4.12 muestra el modelo de propagación para interiores planteado por la ITU, como se puede ver el factor de pérdidas por atenuación exponencial ( $n$ ) puede ser tomado de las tablas 4.5 y 4.7 presentadas anteriormente. Además de estas tablas la tabla 4.9 presenta los valores posibles para el factor de pérdidas por atenuación exponencial ( $n$ ).

<i>Frecuencia</i>	<b>Tipo de ambiente</b>		
	<i>Residencial</i>	<i>Oficina</i>	<i>Comercial</i>
0.9 Ghz		9 para un piso	
		19 para dos pisos	
		24 para tres pisos	
1.8- 2.0 Ghz	$4 n_f$	$15 + 4 (n_f - 1)$	$6 + 3 (n_f - 1)^{26}$

**Tabla 4.10** Valores para el factor de penetración en edificios  $L_f(n_f)$  [8]

La tabla 4.10 muestra la forma en que el modelo ITU-R calcula las pérdidas por penetración en pisos, a partir del valor de  $n_f$ , que es el número de pisos penetrados.

---

#### **4.4 Modelos de propagación para interiores basados en últimas investigaciones.**

A continuación se describirán brevemente ciertos modelos basados en investigaciones recientes, la mayor parte de estos modelos son en gran porcentaje probabilísticos o experimentales con lo que la parte teórica de los modelos de propagación para interiores se ve reducida fuertemente.

Durante los últimos años se han publicado varios artículos enfocados a lograr determinar las pérdidas en interiores, esta sección estará dedicada a describir ciertos modelos con características particulares en su desarrollo. En la mayor parte de los casos las publicaciones de estos modelos no describen de manera clara y precisa las funciones de variables planteadas junto con el tipo de mediciones que se realizaron. Es por este motivo que sólo se dará una descripción de los modelos que expongan datos precisos y coherentes.

Es importante aclarar que se describirán los puntos básicos de los modelos, por lo que si se desea extender más el conocimiento de estos modelos se pueden tomar en cuenta las referencias dadas.

##### **4.4.1 Un Nuevo modelo empírico para la predicción de la propagación en interiores.**

Este modelo está basado en algunos otros modelos empíricos existentes para la predicción de propagación en interiores, pero a estos modelos se les han adicionado los fenómenos técnicos que sufren las ondas electromagnéticas, como la teoría de difracción uniforme sin dejar de tomar en cuenta los grandes adelantos del estudio empírico de los modelos.

La ventaja de este modelo es la disminución del tiempo computacional en los cálculos de las predicciones de pérdidas para interiores, junto con una gran mejora en la precisión de



los cálculos. La ecuación 4.13 describe un modelo planteado empírica y estadísticamente para calcular las pérdidas por trayectoria en interiores.

$$PL(d)[dB] = 10 \log \left( \frac{d}{d_0} \right)^n + \sum_{p=1}^P WAF(p) + \sum_{q=1}^Q FAF(q) \quad (4.13)$$

Donde

$PL(d)[dB]$  son las pérdidas por propagación en interiores.

$WAF(p)$  es el factor de atenuación por pared.

$FAF(q)$  es el factor de atenuación por piso

El fenómeno del punto de ruptura es incorporado a la ecuación 4.13 modificando la ecuación 4.13 del modo siguiente. La ecuación 4.14 es la ecuación que describe la dependencia de la distancia del exponente de pérdidas por trayectoria, que forma parte de los cálculos de este modelo.

$$PL(d)[dB] = 10 \log \left( \frac{d}{d_0} \right)^{n_1} \bigcup (d_{bp} - d) + 10 \left[ \log \left( \frac{d_{bp}}{d_0} \right)^{n_1} + \log \left( \frac{d}{d_{bp}} \right)^{n_2} \right] \bigcup (d - d_{bp}) \quad (4.14)$$

$$+ \sum_{p=1}^P WAF(p) + \sum_{q=1}^Q FAF(q)$$

Donde

$dbp$  es la distancia del punto de ruptura a partir del transmisor

$n_1, n_2$  son los exponentes de pérdidas por trayectoria a cada lado de los puntos de ruptura.

$U(d)$  es la unidad de función por pasos que está descrita del modo siguiente [10].

$$U(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 & d \geq 0 \end{cases} \quad (4.15)$$

A la ecuación 4.14 se le pueden adicionar los factores de atenuación por la dependencia del ángulo  $q_p$  y  $q_q$ , la ecuación 4.16 es la ecuación final para este modelo.

$$PL(d)[dB] = 10 \log \left( \frac{d}{d_0} \right)^{n_1} \cup (d_{bp} - d) + 10 \left[ \log \left( \frac{d_{bp}}{d_0} \right)^{n_1} + \log \left( \frac{d}{d_{bp}} \right)^{n_2} \right] \cup (d - d_{bp}) \quad (4.16)$$

$$+ \sum_{p=1}^P WAF(p) / \cos q_p + \sum_{q=1}^Q FAF(q) / \cos q_q$$

#### 4.4.2 Un Nuevo modelo de predicción de propagación con trazado de rayos.

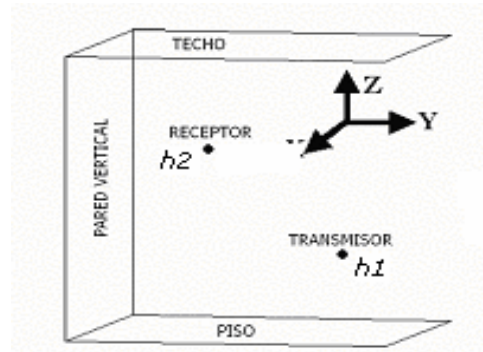
Este modelo está basado y fué desarrollado a partir del modelo de dos rayos en dos dimensiones, con esto se logró el desarrollo de un nuevo modelo de predicción para comunicaciones inalámbricas dentro de construcciones.

Este modelo es más preciso que el modelo en dos dimensiones y más eficiente que el modelo de tres dimensiones.

La descripción del modelo hecho por el autor supone que los ambiente interiores están compuestos por diferentes pisos, techos y paredes verticales. En un piso como ambiente interior podemos encontrar las siguientes propiedades que en parte describen el modelo [13].

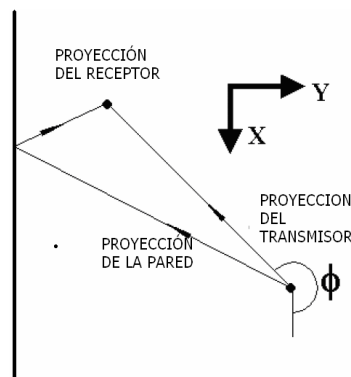
- Cuando el piso o el techo reflejan una señal, el rayo incidente y el reflejado tienen el mismo ángulo azimut llamado, proyección plana perpendicular en el piso.
- En el transmisor, los rayos que son transmitidos en un espacio de tercera dimensión que tienen el equivalente ángulo azimut de la proyección perpendicular en el piso.
- Cuando una pared vertical con respecto al piso refleja un rayo, es un hecho que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión, esto también es válido para las proyecciones perpendiculares con un plano (por ejemplo el piso).

La descripción particular de este modelo menciona que primero se proyectan todas las señales hacia las paredes, el transmisor y el receptor son perpendiculares al piso y se usa el modelo de dos rayos en la proyección del plano y ahí se aplica el modelo de tercera dimensión y sus técnicas están basadas en los resultados del modelo de dos rayos. La figura 4.4 es la representación de un ambiente interior simple, con sólo una pared, un techo y un piso.



**Figura 4.4 Ambiente interior simple [13]**

Las alturas del transmisor y receptor están dadas por  $h_1$  y  $h_2$  por encima del piso, la altura del techo está dada por  $h$ , en la figura 4.5 se puede ver la proyección del rayo con respecto a una pared vertical y la forma de proyección perpendicular que tiene con respecto al transmisor y el receptor.



**Figura 4.5 Proyección perpendicular del Tx y Rx [13]**

Cuando se considera la multi-reflexión entre el techo y el piso, la situación cambia ampliamente. La figura 4.5 supone el hecho de que la longitud que se sabe de las

trayectorias de segunda dimensión es  $d$ , este dato puede ser obtenido con el trazo del modelo en dos dimensiones junto con el ángulo azimut ( $\phi$ ) de las proyecciones.

Se encontró que usando las propiedades de la propagación pueden encontrarse los rayos en tercera dimensión a partir del ángulo azimut ( $\phi$ ) y del ángulo de elevación ( $\theta$ ) que se puede obtener con la ecuación 4.17.

$$q = \frac{\Pi}{2} + a \arctan \left[ \frac{2nh + ah_0}{d} \right] \quad (4.17)$$

Donde  $h_0 = h_1 \pm h_2$  el uso signo positivo y negativo es dependiente del numero total de reflexiones desde el piso y el techo, con lo que son sumadas o restadas.

$a = \pm 1$ , el signo positivo y el negativo son usados cuando la primera reflexión ( que no incluye la reflexión con las paredes) ocurre en el piso y en el techo respectivamente.

$$n = 0, 1, 2 \dots m \text{ ( } n \text{ no puede ser cero cuando } a = -1 \text{)}$$

$n$  es un índice relacionado con el orden considerado de reflexión por el techo y el piso y

$m$  es un índice relacionado con el máximo orden de reflexión por el techo y el piso. La

figura 4.6 muestra una representación del cálculo de este modelo.

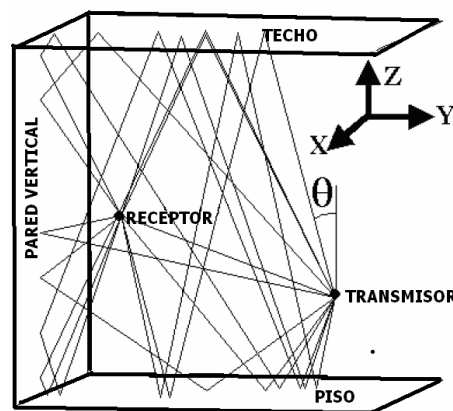


Figura 4.6 Representación Grafica del modelo en 3D [13]

Las trayectorias del transmisor al receptor de este cálculo en tercera dimensión tienen la misma proyección perpendicular en el piso.

#### 4.4.3 Algoritmo eficiente para la predicción de la radio propagación en interiores

Este es un modelo de propagación para interiores basado en la geometría óptica, y se ha vuelto popular por su característica de simular propagación en interiores.

Un edificio se modela como sistema de paredes poligonales. Cada pared se clasifica y asigna con el material de construcción del que está hecho, la asignación es tomada de una pequeña base de datos con los tipos de la pared. Un cálculo de la cobertura es realizado fijando una posición para el transmisor y eligiendo una parte en particular de la muestra señalada, para esto se deben encontrar las trayectorias de propagación del transmisor para tomar muestras de los puntos para cada punto de la muestra, después de esto se suma la energía contribuida por todas las trayectorias al punto de la muestra.

Una trayectoria de propagación es una cadena poligonal, y el cambio de la dirección solamente es una reacción especular de la pared. (La trayectoria de propagación asume que al pasar a través de una pared la dirección no cambia) la potencia de la propagación de la trayectoria está dada por la siguiente ecuación.

$$L_p = P \left( \frac{1}{4\pi} \right)^2 \frac{g_t g_r \Pi_i \mathbf{r}_i \Pi_j \mathbf{t}_j}{|p|^2} \quad (4.18)$$

Donde

$|p|$  es la longitud de la trayectoria en metros

$\lambda$  es la longitud de onda en metros

P es la energía transmitida en miliwatts,

$g_t$  y  $g_r$  son las ganancias del transmisor y del receptor.



$i$  es el índice que varía con respecto a las reflexiones,

$p_i$  es el coeficiente de reflexión  $i$ th.

#### 4.4.4 Efecto del *Shadowing* provocado por el cuerpo humano para ambientes interiores de radio comunicación.

En este modelo se proponen predicciones de propagación determinísticas para las predicciones en ambientes interiores, estos son útiles para estimar la pérdida media de la propagación en los ambientes verdaderos, que generalmente tienen complicadas geometrías. Por lo general estos métodos no pueden acomodar a un cuerpo humano que provoca un efecto de *shadowing*, que es un efecto significativo de la propagación de señales para interiores. Varios modelos empíricos se han divulgado para intentar describir el *shadowing* generado por el cuerpo humano.

Sin embargo, a nuestro conocimiento, no se ha realizado algún modelo apropiado que se pueda utilizar conjuntamente con los métodos deterministas para la predicción de propagación dentro de construcciones.

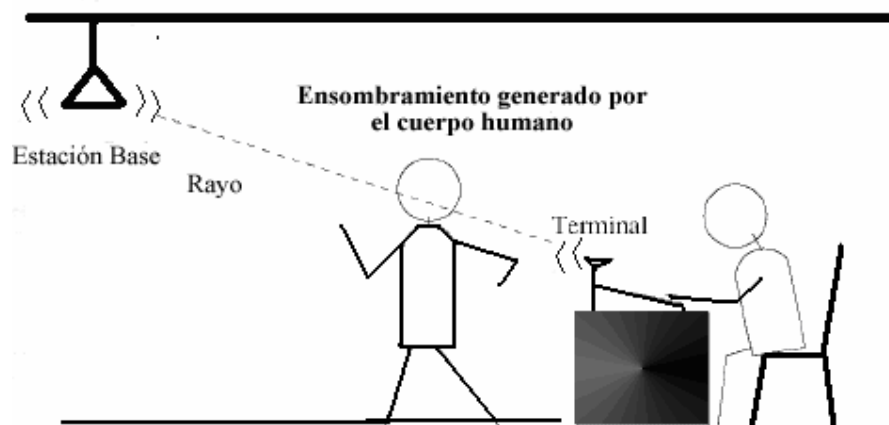


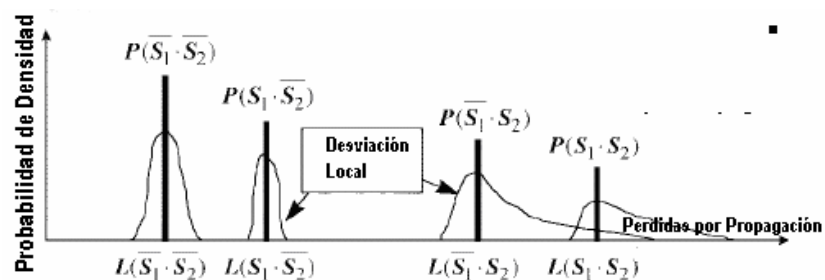
Figura 4.7 Efecto del shadowing generado por el cuerpo humano en ambientes interiores [16]

Este modelo trata de introducir un nuevo modelo práctico, que proporciona una manera de estimar los efectos del *shadowing* por cuerpos humanos en conjunto con los métodos existentes de determinación de la trayectoria de los rayos.

La figura 4.7 muestra una representación del efecto de *shadowing* provocado por el cuerpo humano en ambientes dentro de construcciones. El tipo de pérdidas tomadas por este modelo no es tomado en cuenta para otro tipo de modelos de propagación para interiores, ya que la mayor parte de los modelos sólo toman en cuenta las pérdidas por las paredes, los techos, los pisos y en algunos casos el mobiliario de la construcción.

Este modelo está descrito en los tres pasos que a continuación se explican. Es importante mencionar que este es un modelo que predice la densidad probabilística de las pérdidas por el efecto de *shadowing* generado por el cuerpo humano [16].

El primer paso es determinar la influencia de los rayos, en este paso se utilizan métodos conocidos y de uso actual para determinar los rayos que salieron del transmisor y que llegan al receptor, en este tipo de cálculos es importante establecer algunas características, que nos ayudan a determinar la llegada de los rayos a el receptor, estas características pueden ser reflexiones especulares, penetraciones de paredes u objetos, difracciones y combinaciones de estos fenómenos.



**Figura 4.8 Densidad probabilística del promedio local en conjunto con la probabilidad total de las pérdidas [16].**

El segundo paso a seguir es obtener la probabilidad de densidad discreta del promedio de las pérdidas por propagación locales. Se tomarán en cuenta dos tipos de trayectorias, la primera de estas es la trayectoria que se produce cuando la persona está caminando en el

cuarto, llamadas *walkways*, este movimiento se ve limitado por la presencia de muebles, las paredes, o particiones.

Es un hecho la existencia de muchos posibles *walkways*, como el movimiento de la persona de un escritorio a la salida del cuarto, para tener una mayor simplicidad este modelo se representa tomando todas estas trayectorias de los espacios libres de obstáculos para que las personas puedan caminar.

Después de esto se define la probabilidad por *shadowing* para cada *walkway* que se tomará como un punto arbitrario, junto con la probabilidad de que la persona obstruya a la trayectoria de la señal como se vio en la figura 4.7.

Se determinarán las intersecciones entre los rayos calculados en el primer paso y los *walkways* y los puntos de *shadowing*. Para este caso se asumirá un evento de *shadowing*, como el de una persona atenuando el rayo, este evento ocurre en los puntos de *shadowing* con la probabilidad de *shadowing* de que el punto de *shadowing* del *walkway* sea localizado.

En este modelo se asume que las pérdidas por propagación de un rayo están sujetas a múltiples eventos de *shadowing*, estos eventos incrementan por la constante  $S_L$  [dB], representado como la pérdida adicional por *shadowing*. La ecuación 4.19 muestra la pérdida muestra el promedio local de las pérdidas.

$$L(S_1, S_2, \dots, S_N) = -10 \log \sum_{i=1}^N 10^{-(L_i + L_{sh})/10} [dB] \quad (4.19)$$

El tercer y último paso consiste en sumar la desviación local de pérdidas con la relación de fase por multi-trayectoria. Para lograr esto podemos asumir que en general, una variación distribuida para un promedio local de la relación de la fase entre las diferentes componentes de la longitud de onda.



---

## 4.5 Conclusiones

A través de los distintos modelos presentados en este capítulo, se pueden observar las distintas características que son tomadas en cuenta, se puede mencionar nuevamente la existencia de modelos específicos para ambientes, frecuencias y aplicaciones específicas.

El uso de este tipo de modelos, en conjunto con las mediciones realizadas para las distintas construcciones, nos acercan más a una predicción de las pérdidas para interiores, y a través de la unión con las pérdidas en un enlace satelital, se pueden llegar a obtener cálculos de las pérdidas para una conexión vía satélite con una terminal móvil.