

Recomendación UIT-R P.1238-13 (09/2025)

Serie P: Propagación de las ondas radioeléctricas

Datos de propagación y métodos de predicción para la planificación de sistemas de radiocomunicaciones en interiores y redes radioeléctricas de área local en la gama de frecuencias de 300 MHz a 450 GHz



Prólogo

El Sector de Radiocomunicaciones tiene como cometido garantizar la utilización racional, equitativa, eficaz y económica del espectro de frecuencias radioeléctricas por todos los servicios de radiocomunicaciones, incluidos los servicios por satélite, y realizar, sin limitación de gamas de frecuencias, estudios que sirvan de base para la adopción de las Recomendaciones UIT-R.

Las Conferencias Mundiales y Regionales de Radiocomunicaciones y las Asambleas de Radiocomunicaciones, con la colaboración de las Comisiones de Estudio, cumplen las funciones reglamentarias y políticas del Sector de Radiocomunicaciones.

Política sobre Derechos de Propiedad Intelectual (IPR)

La política del UIT-R sobre Derechos de Propiedad Intelectual se describe en la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI a la que se hace referencia en la Resolución UIT-R 1. Los formularios que deben utilizarse en la declaración sobre patentes y utilización de patentes por los titulares de las mismas figuran en la dirección web <https://www.itu.int/ITU-R/go/patents/es>, donde también aparecen las Directrices para la implementación de la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI y la base de datos sobre información de patentes del UIT-R sobre este asunto.

Series de las Recomendaciones UIT-R

(También disponible en línea en <https://www.itu.int/publ/R-REC/es>)

Series	Título
BO	Distribución por satélite
BR	Registro para producción, archivo y reproducción; películas en televisión
BS	Servicio de radiodifusión (sonora)
BT	Servicio de radiodifusión (televisión)
F	Servicio fijo
M	Servicios móviles, de radiodeterminación, de aficionados y otros servicios por satélite conexos
P	Propagación de las ondas radioeléctricas
RA	Radioastronomía
RS	Sistemas de detección a distancia
S	Servicio fijo por satélite
SA	Aplicaciones espaciales y meteorología
SF	Compartición de frecuencias y coordinación entre los sistemas del servicio fijo por satélite y del servicio fijo
SM	Gestión del espectro
SNG	Periodismo electrónico por satélite
TF	Emisiones de frecuencias patrón y señales horarias
V	Vocabulario y cuestiones afines

Nota: Esta Recomendación UIT-R fue aprobada en inglés conforme al procedimiento detallado en la Resolución UIT-R 1.

Publicación electrónica
Ginebra, 2025

© UIT 2025

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede reproducirse por ningún procedimiento sin previa autorización escrita por parte de la UIT.

RECOMENDACIÓN UIT-R P.1238-13

**Datos de propagación y métodos de predicción para la planificación
de sistemas de radiocomunicaciones en interiores y redes
radioeléctricas de área local en la gama de
frecuencias de 300 MHz a 450 GHz***

(Cuestión UIT-R 211/3)

(1997-1999-2001-2003-2005-2007-2009-2012-2015-2017-2019-2021-2023-2025)

Cometido

En esta Recomendación se proporciona orientación sobre la propagación en interiores en la gama de frecuencias de 300 MHz a 450 GHz, y se brinda información sobre:

- los modelos de pérdida de transmisión básica;
- los modelos de dispersión del retardo;
- los efectos del diagrama de radiación de antena y de la polarización;
- los efectos de la ubicación del transmisor y el receptor;
- los efectos de los materiales de construcción, los acabados y el mobiliario;
- los efectos del movimiento de los objetos en la sala;
- el modelo estadístico en caso de utilización estática.

Palabras clave

Propagación en interiores, pérdida de transmisión básica, dispersión del retardo

Abreviaturas/Glosario

FDP	Función de densidad de probabilidad
HH	Horizontal a horizontal
HPBW	Apertura del haz a media potencia (<i>half power beamwidth</i>)
LoS	Con visibilidad directa (<i>line-of-sight</i>)
MIMO	Múltiples entradas, múltiples salidas (<i>multiple input multiple output</i>)
N/D	No disponible
NLoS	Sin visibilidad directa (<i>non-line-of-sight</i>)
r.m.s.	Valor cuadrático medio (<i>root mean square</i>)
RF	Radiofrecuencia
RLAN	Redes radioeléctricas de área local (<i>radio local area networks</i>)
Rx	Receptor
TM	Terminal móvil
TV	Televisión
Tx	Transmisor

* Se precisan más resultados de medición para validar los modelos por encima de 100 GHz descritos en esta Recomendación, como se propone en la Cuestión UIT-R 211-7/3.

VV	Vertical a vertical
WLAN	Redes de área local inalámbricas (<i>wireless local area networks</i>)
WPBX	Centralitas privadas empresariales inalámbricas (<i>wireless private business exchanges</i>)
XPR	Tasa de discriminación por polarización cruzada

Recomendaciones e Informes de la UIT conexos

Recomendación UIT-R P.676 – Atenuación debida a los gases atmosféricos y efectos conexos

Recomendación UIT-R P.1407 – Propagación por trayectos múltiples y parametrización de sus características

Recomendación UIT-R P.1411 – Datos de propagación y métodos de predicción para la planificación de los sistemas de radiocomunicaciones de exteriores de corto alcance y redes de radiocomunicaciones de área local en la gama de frecuencias de 300 MHz a 100 GHz

Recomendación UIT-R P.2040 – Efectos de los materiales y estructuras de construcción en la propagación de las ondas radioeléctricas en la gama de frecuencias 1 MHz-450 GHz

Informe UIT-R P.2406 – Studies for short-path propagation data and models for terrestrial radiocommunication systems in the frequency range 6 GHz to 450 GHz

NOTA – Debe utilizarse la revisión o edición más reciente de la Recomendación o el Informe.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que se están desarrollando muchas aplicaciones de comunicaciones personales de corto alcance (distancia de explotación inferior a 1 km), que funcionarán en interiores;
- b) que hay una gran demanda de redes radioeléctricas de área local (RLAN) y de centralitas privadas empresariales inalámbricas (WPBX), como demuestran los productos existentes y la intensa actividad de investigación;
- c) que conviene establecer normas RLAN compatibles con las comunicaciones alámbricas e inalámbricas;
- d) que los sistemas de corto alcance que consumen poca potencia tienen muchas ventajas para el suministro de servicios en entornos móviles y personales, como las redes de sensores RF y los dispositivos inalámbricos que utilizan los espacios en blanco de las bandas de televisión;
- e) que el conocimiento de las características de propagación dentro de los edificios y la interferencia ocasionada por múltiples usuarios en la misma zona es crítico para el diseño eficaz de los sistemas;
- f) que se requieren modelos generales (esto es, independientes de la instalación) y asesoramiento para comenzar a planificar los sistemas y evaluar la interferencia, así como para elaborar modelos determinísticos (para una instalación determinada), con el fin de realizar evaluaciones detalladas,

observando

que el Informe UIT-R P.2406 proporciona información de base adicional sobre cómo se obtuvieron y derivaron los datos y modelos de medición en la Recomendación,

reconociendo

- a) que la Recomendación UIT-R P.1411 ofrece directivas sobre la propagación en exteriores de corto alcance en la gama de frecuencias comprendida entre 300 MHz y 300 GHz y que dicha Recomendación debe consultarse en las situaciones en que se presentan condiciones de propagación en interiores y en exteriores;
- b) que la Recomendación UIT-R P.2040 contiene directrices sobre los efectos de las propiedades de los materiales y estructuras de construcción en la propagación de las ondas radioeléctricas,

recomienda

que se adopte la información y los métodos consignados en el Anexo para evaluar las características de propagación de los sistemas radioeléctricos de interiores entre 300 MHz y 450 GHz.

Anexo

ÍNDICE

		<i>Página</i>
1	Introducción.....	4
2	Degrado de la propagación y mediciones de calidad de los sistemas radioeléctricos en interiores	5
3	Modelos de pérdida de transmisión básica.....	6
3.1	Modelos generales en cuanto al lugar de instalación.....	6
3.2	Modelos específicos en cuanto al lugar de instalación.....	7
4	Modelos de dispersión del retardo	12
4.1	Trayectos múltiples.....	12
4.2	Respuesta a los impulsos	12
4.3	Valor eficaz (valor cuadrático medio) de la dispersión del retardo	12
4.4	Estadísticas sobre selectividad de frecuencia	18
4.5	Modelos para una instalación determinada.....	18
5	Efectos de la polarización.....	19
5.1	Visibilidad directa.....	19
5.2	Trayecto obstruido	21
5.3	Orientación del terminal móvil	21
6	Efecto del diagrama de radiación de la antena	21
6.1	Pérdida de potencia recibida debido a la apertura del haz de la antena direccional.....	21
6.2	Características de la dispersión del retardo y la dispersión angular	22

7	Efectos de la ubicación del transmisor y el receptor	26
8	Efectos de los materiales de construcción, los acabados y el mobiliario	26
9	Efecto de los movimientos de los objetos en una sala.....	26
10	Modelos de dispersión angulas.....	28
10.1	Modelo de conglomerado	28
10.2	Distribución angular de las ondas de llegada dentro del conglomerado <i>i</i> -ésimo	29
10.3	Dispersión angular de doble dirección	30
11	Modelo estadístico en caso de utilización estática	30
11.1	Definición	30
11.2	Modelo del sistema	31

1 Introducción

En el caso de los sistemas radioeléctricos de interiores, la predicción de la propagación difiere en cierta medida de la que se efectúa en relación con los sistemas de exteriores. El objetivo, como sucede en el caso de los sistemas de exteriores, es garantizar una cobertura eficaz de la zona deseada (para garantizar un trayecto fiable, cuando se trata de sistemas punto a punto) y evitar la interferencia tanto dentro del sistema como con otros sistemas. No obstante, en interiores la cobertura depende notablemente de la geometría de los edificios, cuyos límites afectan además a la propagación. Aparte de la reutilización de frecuencias en el mismo piso de un edificio, suele ser necesario reutilizar una frecuencia entre diferentes pisos del mismo edificio, por lo cual hay que considerar una tercera dimensión en las cuestiones de interferencia. Por último, la gama de ondas muy cortas, especialmente cuando se utilizan frecuencias de ondas milimétricas, implica que los pequeños cambios en el entorno inmediato del trayecto radioeléctrico pueden afectar sustancialmente a las características de propagación.

Debido a la complejidad de estos factores, sería necesario un conocimiento detallado del lugar de instalación como, por ejemplo, geometría, materiales, mobiliario y normas de utilización previstas, para proyectar concretamente un sistema radioeléctrico en interiores. No obstante, durante la planificación inicial de un sistema hay que estimar el número de estaciones de base necesarias para proporcionar cobertura a estaciones móviles diseminadas dentro de la zona y estimar la interferencia que puede ocaionarse a otros servicios o producirse entre los sistemas. Para esa planificación de sistemas se necesitan modelos que representen en general las características de propagación en ese entorno. Ahora bien, el modelo no debe exigir la aportación de un gran volumen de información por parte del usuario para poder efectuar los cálculos necesarios.

En este Anexo se describen principalmente modelos generales independientes del lugar de instalación y se ofrece información cualitativa sobre los factores que pueden afectar a la propagación en un entorno radioeléctrico en interiores. Siempre que ha sido posible, hemos presentado modelos aplicables a una instalación determinada. En muchos casos, los datos disponibles para elaborar modelos son limitados, tanto en lo que concierne a las frecuencias como a los entornos de prueba; es de esperar que se amplíe la información contenida en este Anexo cuando se disponga de más datos. Asimismo, aunque la precisión de los modelos mejorará con la experiencia que se adquiera de su aplicación, este Anexo contiene la mejor información disponible hasta el momento.

2 Degradación de la propagación y mediciones de calidad de los sistemas radioeléctricos en interiores

Las degradaciones de la propagación en un canal radioeléctrico en interiores se deben principalmente a:

- la reflexión de los objetos (incluidas paredes y suelos) y la difracción en torno a éstos dentro de las salas;
- la pérdida de transmisión a través de paredes, suelos y otros obstáculos;
- la canalización de la energía, especialmente en pasillos a frecuencias elevadas;
- el movimiento de personas y objetos en la sala, lo que puede incluir uno o ambos extremos del enlace radioeléctrico;

y producir degradaciones tales como:

- la pérdida de transmisión básica – no sólo la pérdida de transmisión básica en el espacio libre sino también la pérdida adicional debida a los obstáculos y la transmisión a través de materiales de construcción. La pérdida de transmisión básica en el espacio libre se puede reducir mediante la distribución de canales;
- la variación temporal y espacial de la pérdida de transmisión básica;
- los efectos de los trayectos múltiples de los componentes reflejados y difractados de la onda;
- el desajuste de la polarización ocasionado por la alineación aleatoria del terminal móvil.

Los servicios de comunicaciones inalámbricas de interiores pueden caracterizarse por los siguientes aspectos:

- velocidad de datos alta/media/baja;
- zona de cobertura de cada estación de base (por ejemplo, habitación, piso, edificio);
- móvil/portátil/fijo;
- en tiempo real/casi real/no en tiempo real;
- topología de la red (por ejemplo, punto a punto, punto a multipunto, de cada punto a cada punto).

Conviene determinar las características de propagación de canal más adecuadas para describir su calidad con respecto a diferentes aplicaciones como, por ejemplo, los servicios de comunicación vocal, transferencia de datos a diferentes velocidades y vídeo. En el Cuadro 1 se indican las características más significativas de servicios típicos.

CUADRO 1
Servicios típicos y degradaciones de la propagación

Servicio	Características	Degradiaciones perjudiciales de la propagación
Red de área local inalámbrica	Alta velocidad de datos, una o varias habitaciones, portátil, no en tiempo real, punto a multipunto o de cada punto a cada punto	Pérdida de transmisión básica – Distribución temporal y espacial Retardo de propagación por trayectos múltiples Relación de intensidades en el modo deseado y en el no deseado
WPBX	Velocidad de datos media, múltiples habitaciones, uno o múltiples pisos, en tiempo real, móvil, punto a multipunto	Pérdida de transmisión básica – Distribución temporal y espacial

CUADRO 1 (*fin*)

Servicio	Características	Degradaciones perjudiciales de la propagación
Radiobúsqueda en interiores	Baja velocidad de datos, múltiples pisos, no en tiempo real, móvil, punto a multipunto	Pérdida de transmisión básica – Distribución temporal y espacial
Vídeo inalámbrico en interiores	Alta velocidad de datos, múltiples habitaciones, en tiempo real, móvil o portátil, punto a punto	Pérdida de transmisión básica – Distribución temporal y espacial Retardo de propagación por trayectos múltiples

3 Modelos de pérdida de transmisión básica

La utilización del presente modelo de pérdida de transmisión en interiores supone que la estación de base y el terminal portátil están situados en el mismo edificio. La pérdida de transmisión básica radioeléctrica entre la estación básica y la móvil/portátil en interiores puede estimarse aplicando modelos generales o específicos para cada instalación.

3.1 Modelos generales en cuanto al lugar de instalación

El modelo general en cuanto al lugar de instalación es aplicable cuando tanto la estación transmisora como la estación receptora están situadas en el mismo piso. La pérdida de transmisión básica mediana se obtiene con la siguiente ecuación:

$$L_b(d, f) = 10\alpha \log_{10}(d) + \beta + 10\gamma \log_{10}(f) \quad \text{dB} \quad (1)$$

Con una variable aleatoria gaussiana de media cero aditiva $N(\mu, \sigma)$ con una desviación típica σ (dB), donde:

- d : distancia en 3D directa entre las estaciones transmisora y receptora (m)
- f : frecuencia de funcionamiento (GHz)
- α : coeficiente asociado al incremento de la pérdida de transmisión básica con la distancia
- β : coeficiente asociado al valor de desplazamiento de la pérdida de transmisión básica
- γ : coeficiente asociado al incremento de la pérdida de transmisión básica con la frecuencia.

Para las simulaciones Monte Carlo sin visibilidad directa (NLoS), el exceso de pérdida de transmisión básica con respecto a la pérdida de transmisión básica en el espacio libre, L_{FS} ($L_{FS} = 20 \log_{10}(4 \times 10^9 \pi d f / c)$, donde c es la velocidad de la luz en m/s), no será superior a $10 \log_{10}(10^{0.1A} + 1)$ (dB), siendo A una variable aleatoria con distribución normal $N(\mu, \sigma)$, con media $\mu = L_b(d, f) - L_{FS}$ y desviación típica de σ .

En el Cuadro 2 se indican los valores de los coeficientes recomendados para los entornos de propagación en interiores.

CUADRO 2

Coeficientes de pérdida de transmisión básica

Entorno	LoS/NLoS	Gama de frecuencias (GHz)	Gama de distancia (m)	α	β	γ	σ
Edificio de oficinas	LoS	0,3-294,0	2-27	1,47	34,17	2,08	3,68
	NLoS	0,3-255,0	4-30	2,39	30,13	2,40	5,01
Pasillo	LoS	0,3-300,0	2-160	1,57	29,46	2,24	3,77
	NLoS	0,625-159,0	3-94	2,78	28,62	2,54	7,58
Fábrica	LoS	0,625-294,0	2-102	2,27	24,79	2,10	2,62
	NLoS	0,625-255,0	3-110	2,80	23,55	2,16	5,70
Sala de conferencias/ponencias	LoS	0,45-300,0	2-21	1,56	30,47	2,23	2,92
	NLoS	0,45-159,0	4-25	1,40	39,53	2,37	3,33

3.2 Modelos específicos en cuanto al lugar de instalación

Para estimar la pérdida de transmisión básica o la intensidad de campo, también conviene utilizar modelos específicos en cuanto al lugar de instalación. Se dispone de modelos para predecir la intensidad de campo en interiores basados en la teoría uniforme de la difracción y técnicas de trazado de rayos. Para calcular la intensidad de campo en interiores se necesita información detallada sobre la estructura del edificio. Estos modelos combinan elementos empíricos con el método electromagnético teórico de la teoría uniforme de la difracción. El método tiene en cuenta los rayos directos, con una sola reflexión y una sola difracción, y puede ampliarse a múltiples difracciones o múltiples reflexiones, así como a combinaciones de rayos difractados y reflejados. Al incluir los rayos reflejados y difractados, la precisión de la predicción de la pérdida de transmisión básica aumenta considerablemente.

En caso de utilización de antenas directivas, la pérdida de transmisión básica radioeléctrica en interiores se caracteriza por una pérdida de trayecto media y las estadísticas asociadas de desvanecimiento debido a sombras. Existen varios modelos de pérdida de transmisión básica en interiores que tienen en cuenta la atenuación de la señal a través de múltiples paredes y/o pisos. En este modelo se considera la pérdida a través de varios pisos, a fin de tener presentes características tales como la reutilización de frecuencias entre distintos pisos. Los coeficientes de pérdida de potencia debida a la distancia que se indican a continuación tienen en cuenta implícitamente la transmisión a través de paredes, así como a través de obstáculos y por encima de éstos, así como otros factores de pérdidas que pueden manifestarse en un solo piso de un edificio. La teoría uniforme de la difracción y las técnicas de trazado de rayos podrían ofrecer la posibilidad de incorporar explícitamente la pérdida debida a cada pared, en lugar de incluirla en el modelo basado en la distancia.

El valor mediano de la pérdida de transmisión básica de las antenas transmisoras direccionales con una anchura de haz de 40° hacia una antena receptora omnidireccional ubicada en una sola sala o espacio del mismo piso no tiene en cuenta la transmisión a través de paredes y adopta la forma del modelo general que se indica en la ecuación (1), con los parámetros especificados en el Cuadro 3.

CUADRO 3

Coeficientes de pérdida de transmisión básica desde antenas direccionales hacia antenas omnidireccionales

Entorno	LoS/NLoS	Gama de distancia (m)	Gama de frecuencias (GHz)	α	β	γ	σ
Pasillo	LoS	4-21	0,6-73 ⁽¹⁾	1,43	29,3	2,38	2,92
	NLoS	5,8-23		3,19	16,9	2,71	4,28
Edificio de oficinas	LoS	4,9-21,5	0,6-73 ⁽¹⁾	1,29	32	2,32	2,75
	NLoS	14,2-29,2		3,46	14,1	2,61	3,04
Fábrica	LoS	5,8-25,7	0,6-73 ⁽¹⁾	1,84	24,6	2,43	2,29
	NLoS	6,5-25,9		2,92	22,3	3,34	6,14

⁽¹⁾ Para llegar a los valores de 60 GHz y 70 GHz, se considera una propagación dentro de una sola sala o espacio, y no se tiene en cuenta en modo alguno la transmisión a través de las paredes. La absorción gaseosa en torno a los 60 GHz es significativa para distancias superiores a unos 100 m, lo que puede influir en las distancias de reutilización de las frecuencias (véase la Recomendación UIT-R P.676).

El modelo de pérdida de transmisión básica específico del lugar de instalación también puede utilizar el formato siguiente:

$$L_{total} = L(d_o) + N \log_{10} \frac{d}{d_o} + L_f(n) \quad (2)$$

donde:

- N : coeficiente de pérdida de potencia debida a la distancia
- f : frecuencia (MHz)
- d : distancia de separación (m) entre la estación de base y el terminal portátil (siendo $d > 1$ m)
- d_o : distancia de referencia (m)
- $L(d_o)$: pérdida de transmisión básica en d_o (dB), para una distancia de referencia d_o a 1 m, y suponiendo propagación en el espacio libre $L(d_o) = 20 \log_{10} f - 28$, donde f es en MHz
- L_f : factor de pérdida debida a la penetración en el suelo (dB)
- n : número de pisos entre la estación de base y el terminal portátil ($n \geq 0$), $L_f = 0$ dB para $n = 0$.

En los Cuadros 4 y 5 se indican los parámetros típicos basados en los resultados de varias mediciones. Al final de este punto, se proporciona también unas directrices generales.

CUADRO 4

Coeficientes de pérdida de potencia, N , para el cálculo de la pérdida de transmisión en interiores

Frecuencia (GHz)	Edificio de oficinas	Edificio comercial	Fábrica	Pasillo	Centro de datos
28		27,6 ⁽¹⁾ 17,9 ^{(2), (3)} 24,8 ^{(2), (3)}	—	—	—
38		18,6 ^{(2), (3)} 25,9 ^{(2), (3)}	—	—	—
250	20,1 ⁽⁵⁾	—	—	19,0 ^{(2), (5)}	—
275	20 ⁽⁵⁾	—		19,2 ^{(2), (5)}	—
300	20 ⁽⁴⁾	—	—	19,5 ^{(2), (4)}	20,2 ⁽⁴⁾
325	19,8 ⁽⁶⁾	—	—	19,6 ^{(2), (6)}	—
340	20,8 ⁽⁷⁾			19,9 ^{(2), (7)}	
410	20,6 ⁽⁵⁾			20,1 ^{(2), (5)}	

- ⁽¹⁾ Estación de ferrocarril (170 m × 45 m × 21 m (altura)) y terminal de aeropuerto (650 m × 82 m × 20 m (altura)): se trata de un caso NLoS, la antena con una apertura del haz a media potencia de 60° para el transmisor se encuentra a una altura de 8 m, y la antena con una apertura del haz de 10° para el receptor se encuentra a 1,5 m sobre el suelo. El valor se obtuvo a partir de la ganancia máxima del trayecto teniendo en cuenta varias orientaciones de antenas de transmisión y de recepción.
- ⁽²⁾ El número mayor es para los casos LoS y el número menor para los casos NLoS.
- ⁽³⁾ El entorno es el mismo que en ⁽²⁾ con una antena de transmisión con una apertura del haz de 60° situada a una altura de 8 m y una antena omnidireccional de recepción situada a una altura de 1,5 m.
- ⁽⁴⁾ Las antenas de transmisión y recepción tienen una apertura del haz de 10°.
- ⁽⁵⁾ Las antenas de transmisión y recepción tienen una apertura del haz de 8°.
- ⁽⁶⁾ Las antenas de transmisión y recepción tienen una apertura del haz de 7°.
- ⁽⁷⁾ Las antenas de transmisión y recepción tienen una apertura del haz de 9°.

CUADRO 5

Factores de pérdida de penetración en el suelo, L_f (dB), siendo n el número de pisos penetrados, para el cálculo de la pérdida de transmisión en interiores ($n \geq 1$)

Frecuencia (GHz)	Edificio residencial	Edificio de oficinas	Edificio comercial
0,9	—	9 (1 piso) 19 (2 pisos) 24 (3 pisos)	—
1,8-2	4 n	15 + 4 (n - 1)	6 + 3 (n - 1)
2,4	10 ⁽¹⁾ (apartamento) 5 (casa)	14	—
3,5		18 (1 piso) 26 (2 pisos)	—
5,2	13 ⁽¹⁾ (apartamento) 7 ⁽²⁾ (casa)	16 (1 piso)	—
5,8	—	22 (1 piso) 28 (2 pisos)	—

⁽¹⁾ Pared de cemento.

⁽²⁾ Conglomerado de madera.

En las diferentes bandas de frecuencias en que no se disponga de un coeficiente de pérdida de potencia aplicable a los edificios residenciales, puede utilizarse el correspondiente a los edificios de oficinas.

Hay que señalar que puede haber un límite al aislamiento previsto a través de varios pisos. La señal puede pasar por otros trayectos externos para completar el enlace con una pérdida total inferior a la pérdida de penetración a través de un gran número de pisos.

Cuando se excluyen los trayectos externos, las mediciones en 5,2 GHz han demostrado que con incidencia normal la pérdida adicional media debida a un suelo de cemento reforzado típico con un techo falso suspendido es de 20 dB, con una desviación típica de 1,5 dB. Los dispositivos de iluminación aumentaron las pérdidas medias a 30 dB, con una desviación típica de 3 dB, y los conductos de aire bajo el suelo aumentaron las pérdidas medias a 36 dB, con una desviación típica de 5 dB. En modelos específicos al lugar tales como trazados de rayos deberán utilizarse estos valores en vez de L_f .

Las estadísticas de desvanecimiento debido a sombras en interiores son log-normales y los valores de desviación típica (dB) figuran en el Cuadro 6.

CUADRO 6

**Estadísticas de desvanecimiento debido a sombras, desviación típica (dB)
para el cálculo de la pérdida de transmisión en interiores**

Frecuencia (GHz)	Edificio de oficinas	Edificio comercial	Fábrica	Pasillo
28	3,4 ⁽²⁾ 6,6 ⁽²⁾	6,7 ⁽¹⁾ 1,4 ^{(2), (3)} 6,4 ^{(2), (3)}		
38	4,6 ⁽²⁾ 6,8 ⁽²⁾	1,6 ^{(2), (3)} 5,5 ^{(2), (3)}		

Notas al Cuadro 6:

- (1) Estación de ferrocarril (170 m × 45 m × 21 m (altura)) y terminal de aeropuerto (650 m × 82 m × 20 m (altura)): se trata de un caso NLoS, la antena del transmisor, con una apertura del haz a media potencia de 60°, se encuentra a una altura de 8 m, y la antena del receptor, con una apertura del haz de 10°, se encuentra a 1,5 m sobre el suelo. El valor se obtuvo a partir de la ganancia máxima del trayecto teniendo en cuenta varias orientaciones de las antenas de transmisión y recepción.
- (2) El número mayor es para los casos LoS y el número menor para los casos NLoS.
- (3) El entorno es el mismo que en (1) con una antena de transmisión con una apertura del haz de 60° situada a 8 m de altura y una antena omnidireccional de recepción situada a 1,5 m de altura.

Aunque las mediciones se han realizado en condiciones diferentes, lo cual dificulta las comparaciones directas, y sólo se han comunicado resultados sobre un número limitado de bandas de frecuencias, se pueden sacar unas cuantas conclusiones generales, especialmente en el caso de la banda 900-2 000 MHz:

- En los trayectos con un componente de visibilidad directa predomina la pérdida en el espacio libre y estos trayectos tienen un coeficiente de aproximadamente 20 de pérdida de potencia debida a la distancia.
- Las grandes salas abiertas tienen también un coeficiente de aproximadamente 20 de pérdida de potencia debida a la distancia; ello puede deberse a un importante componente de visibilidad directa en la mayoría de las zonas de la sala. A este respecto, pueden citarse los grandes almacenes, estadios deportivos y fábricas y oficinas sin separaciones interiores.
- En los pasillos se registra una pérdida de transmisión básica inferior a la que se produce en espacio libre, con un coeficiente típico de aproximadamente 18 de pérdida de potencia debida a la distancia. Las tiendas de alimentación con largas estanterías lineales presentan la pérdida característica de los pasillos.
- La propagación en torno a obstáculos y a través de paredes contribuye considerablemente a la pérdida que puede producirse al poder elevarse hasta un valor del orden de 40 el coeficiente de pérdida de potencia debida a la distancia en un entorno típico. A este respecto pueden citarse los espacios entre salas en edificios de oficinas con separaciones interiores.
- En el caso de largos trayectos sin obstrucciones, puede producirse el primer umbral de zona de Fresnel. A esa distancia, el coeficiente de pérdida de potencia debida a la distancia puede pasar de 20 a 40 aproximadamente.
- No siempre se observa o explica claramente la reducción del coeficiente de pérdida de transmisión básica con el aumento de la frecuencia para un entorno de oficina (Cuadro 2). Por otro lado, al aumentar la frecuencia, aumenta la pérdida debida a los obstáculos (por ejemplo, paredes, mobiliario), y las señales difractadas contribuyen menos a la potencia recibida; además, la zona de Fresnel está menos obstruida a frecuencias superiores, lo que

produce una pérdida menor. La pérdida de transmisión básica real depende de estos mecanismos opuestos.

4 Modelos de dispersión del retardo

4.1 Trayectos múltiples

El canal radioeléctrico de propagación móvil/portátil varía con el tiempo, la frecuencia y el desplazamiento espacial. Incluso en situación estática en que el transmisor y el receptor están fijos, el canal puede ser dinámico ya que puede haber dispersores y reflectores en movimiento. La expresión trayectos múltiples se justifica por el hecho de que, debido a la reflexión, la difracción y la dispersión, las ondas radioeléctricas pueden viajar por muchos trayectos de un transmisor a un receptor. Hay asociado con cada uno de esos trayectos un retardo proporcional a la longitud de los mismos. (Se puede obtener una estimación muy aproximada del retardo máximo que cabe esperar en un determinado entorno, tomando simplemente las dimensiones de una sala y sabiendo que el tiempo (ns) que tarda un impulso radioeléctrico en recorrer la distancia d (m) es de aproximadamente $3,3 d$.) Estas señales retardadas, cada una de ellas con una amplitud asociada, forman un filtro lineal cuyas características varían con el tiempo.

4.2 Respuesta a los impulsos

El objetivo de la preparación de modelos de canales es ofrecer representaciones matemáticas precisas de la propagación radioeléctrica para utilizarlas en simulaciones de enlaces y sistemas radioeléctricos con el fin de elaborar modelos de instalación de sistemas. Como el canal radioeléctrico es lineal, queda descrito íntegramente por su respuesta a los impulsos. Una vez conocida la respuesta a los impulsos, puede determinarse la respuesta del canal radioeléctrico a cualquier elemento de entrada. En esto se basa la simulación de la calidad de funcionamiento de los enlaces.

La respuesta a los impulsos se representa normalmente como densidad de potencia en función del exceso de retardo, con respecto a la primera señal detectable. Esta función suele denominarse perfil de retardo de potencia y se ejemplifica en la Fig. 1 de la Recomendación UIT-R P.1407, aunque la escala de tiempo de los canales en interiores debe medirse en nanosegundos y no en microsegundos. Esta Recomendación también contiene definiciones de varios parámetros que caracterizan los perfiles de respuesta a los impulsos.

La respuesta de un canal a los impulsos varía con la posición del receptor y puede hacerlo también con el tiempo. En consecuencia, se mide y considera normalmente como una media de perfiles medidos en una longitud de onda para reducir los efectos del ruido, o en varias longitudes de onda para determinar un promedio espacial. Es importante definir claramente de qué media se habla e indicar cómo se ha calculado esa media. El procedimiento de promediación recomendado consiste en preparar un modelo estadístico de la siguiente forma: para cada estimación de la respuesta a los impulsos (perfil de retardo de potencia), hay que precisar los tiempos antes y después del retardo medio, T_D , (véase la Recomendación UIT-R P.1407, por encima del cual la densidad de potencia no excede valores específicos ($-10, -15, -20, -25, -30$ dB) con respecto a la densidad de potencia máxima. El modelo queda constituido por el valor mediano y, si se desea, por el percentil del 90% de las distribuciones de estos tiempos.

4.3 Valor eficaz (valor cuadrático medio) de la dispersión del retardo

Como se ha indicado anteriormente, los perfiles del retardo de potencia suelen caracterizarse por uno o varios parámetros. Estos parámetros deberían calcularse a partir de perfiles promediados en un área cuyas dimensiones son equivalentes a varias longitudes de onda (aunque el parámetro del valor eficaz de la dispersión del retardo se halla algunas veces a partir de ciertos perfiles y los valores resultantes

se promedian, pero en general el resultado no es el mismo que el que arroja un perfil promediado). Habría que comunicar un umbral de exclusión de ruido o criterio de aceptación, de, por ejemplo, 30 dB por debajo del valor máximo del perfil, junto con la dispersión del retardo resultante, que depende de este umbral.

Aunque el valor eficaz de la dispersión del retardo se utiliza con gran frecuencia, no siempre define adecuadamente el perfil del retardo. En entornos de trayectos múltiples en los cuales la dispersión del retardo sobrepasa la duración de los símbolos, la BER para la MDP depende no tanto del valor eficaz de la dispersión del retardo como de la relación entre la potencia recibida de la onda deseada y la de la no deseada. Esto es particularmente evidente en el caso de sistemas de alta velocidad de símbolos, pero también se registra incluso a velocidades de símbolos bajas en las que hay una fuerte señal dominante entre los componentes de trayectos múltiples (desvanecimiento de Rice).

Con todo, si se parte de un perfil de disminución exponencial, basta para expresar el valor eficaz de la dispersión del retardo en lugar del perfil de retardo de potencia. En este caso, la respuesta a los impulsos puede reconstruirse aproximadamente de la siguiente forma:

$$h(t) = \begin{cases} e^{-t/S} & \text{para } 0 \leq t \leq t_{\max} \\ 0 & \text{en otros casos} \end{cases} \quad (3)$$

donde:

S : valor eficaz de la dispersión del retardo

t_{\max} : retardo máximo

$t_{\max} \gg S$.

La utilización del valor eficaz de la dispersión del retardo como parámetro de salida del modelo tiene la ventaja de que ese modelo puede expresarse simplemente en forma de cuadro. En el Cuadro 7 se indican una serie de parámetros característicos de la dispersión del retardo, estimados a partir de perfiles de retardo promediados para entornos en interiores. En el Cuadro 7, la columna B contiene valores medianos que se registran con frecuencia, las columnas A y C corresponden a los valores 10% y 90% de la distribución acumulativa. Los valores que figuran en el Cuadro representan las dimensiones más grandes que pueden tener las salas en cada entorno.

CUADRO 7
Parámetros del valor eficaz de la dispersión del retardo

Frec. (GHz)	Entorno	Polari- zación	Resolución del retardo (ns)	Apertura del haz de Tx (grados)	Apertura del haz de Rx (grados)	A (ns)	B (ns)	C (ns)	Nota para A, B, C
1,9	Edificio residencial	VV	10	Omni	Omni	20	70	150	–
	Edificio de oficinas	VV	10	Omni	Omni	35	100	460	–
	Edificio comercial	VV	10	Omni	Omni	55	150	500	–
2,25	Estudio de TV	VV	4,2	Omni	Omni	–	13 26	–	(3)

CUADRO 7 (*continuación*)

Frec. (GHz)	Entorno	Polari- zación	Resolución del retraso (ns)	Apertura del haz de Tx (grados)	Apertura del haz de Rx (grados)	A (ns)	B (ns)	C (ns)	Nota para A, B, C
2,625	Edificio de oficinas	VV	1,8	Omni	Omni	8	11	12,5	(1)
		VV	1,8	Omni	Omni	10,74	13,74	20,15	(2)
	Pasillo	VV	1,8	Omni	Omni	8,49	18,53	25,16	—
	Estudio de grabación	VV	1,8	Omni	Omni	7,98	11,89	14,47	—
	Fábrica	VV	1,8	Moni	Omni	51,5	69,2	87,2	—
3,7	Edificio residencial	VV	10	Omni	Omni	15	22	27	—
	Edificio de oficinas	VV	10	Omni	Omni	30	38	45	—
	Edificio comercial	VV	10	Omni	Omni	105	145	170	—
5,2	Edificio residencial	VV	10	Omni	Omni	17	23	30	—
	Edificio de oficinas	VV	10	Omni	Omni	38	60	110	—
	Edificio comercial	VV	10	Omni	Omni	135	190	205	—
12,65- 14,15	Fábrica	VV	1	18	Omni	2,9 7,5	4,9 21,6	16,7 26,4	(3)
	Centro de computadoras	VV	1	18	Omni	1,2 7,6	2,8 14,3	8,7 22,9	(3)
14,9- 16,4	Pasillo	VV	1	Omni	Omni	4,7 7,2	12,9 11,4	23,7 16,3	(3)
	Sala de conferencias	VV	1	Omni	Omni	12,36	16,53	20,63	caso LoS
	Centro de computadoras	VV	1	Omni	Omni	5,3 12,6	20,5 21,6	33,5 26,5	(3)
	Fábrica	VV	1	Omni	Omni	4,4 18,0	11,6 23,3	19,4 28,1	(3)
	Edificio de oficinas	VV	1	Omni	Omni	9,7 12,3	17,5 17,8	25,5 23,2	(3)

CUADRO 7 (*continuación*)

Frec. (GHz)	Entorno	Polari- zación	Resolución del retardo (ns)	Apertura del haz de Tx (grados)	Apertura del haz de Rx (grados)	A (ns)	B (ns)	C (ns)	Nota para A, B, C
16,82- 18,32	Pasillo	VV	1	Omni	Omni	3,8 6,5	11,9 11,8	19,8 18,3	(3)
	Sala de conferen- cias	VV	1	Omni	Omni	12,16	18,73	23,56	caso LoS
	Centro de computa- doras	VV	1	Omni	Omni	4,7 13,3	13,4 21,3	25,9 26,3	(3)
	Fábrica	VV	1	Omni	Omni	4,7 17,5	8,5 22,9	15,4 28,9	(3)
	Edificio de oficinas	VV	1	Omni	Omni	9,9 13,3	18,5 21,6	24,9 27,7	(3)
25,3-28,3	Fábrica	VV	0,5	18	Omni	4,9 5,1	7,7 17,2	12,1 29,8	(3)
	Centro de computa- doras	VV	0,5	18	Omni	0,9 8,4	14,8 16,9	26,2 23,1	(3)
	Pasillo	VV	1	Omni	Omni	3,7 5,9	11,6 12,0	16,9 17,4	(3)
	Sala de conferen- cias	VV	1	Omni	Omni	13,83	17,56	21,80	caso LoS
	Centro de computa- doras	VV	1	Omni	Omni	6,5 13,1	17,0 16,7	29, 23,6	(3)
	Fábrica	VV	1	Omni	Omni	5,3 15,9	9,5 22,5	15,6 28,5	(3)
	Edificio de oficinas	VV	1	Omni	Omni	9,4 8,6	15,3 16,0	20,9 21,2	(3)
28	Edificio comercial	VV	2	60	Omni	17 36	34 65	64 86	(3), (5)
29,3-31,5	Centro de computa- doras	Doble ⁽⁴⁾	0,45	35	35	1,2	2,5	14	(5)
			0,45	35	35	1,6	17,6	34	(7)
36-40,5	Pasillo	VV	0,67	Omni	Omni	5,8 4,0	13,2 13,2	23,1 19,8	(3)
	Sala de conferen- cias	VV	0,67	Omni	Omni	10,8 4	15,21	18,97	caso LoS
	Centro de computa- doras	VV	0,67	Omni	Omni	6,5 10,7	17,0 16,7	31,0 22,3	(3)

CUADRO 7 (*continuación*)

Frec. (GHz)	Entorno	Polari- zación	Resolución del retraso (ns)	Apertura del haz de Tx (grados)	Apertura del haz de Rx (grados)	A (ns)	B (ns)	C (ns)	Nota para A, B, C
	Fábrica	VV	0,67	Omni	Omni	5,8 15,7	9,3 19,8	14,5 25,2	(3)
	Edificio de oficinas	VV	0,67	Omni	Omni	5,6 9,8	9,7 12,6	17,1 16,7	(3)
38	Comercial	VV	2	40	Omni	4 42	26 69	55 82	(3), (5)
51-57	Centro de computa- doras	VV/HH	0,5	56,3	18,4	0,69	0,96	2,89	(5)
					18,4	2,14	10,7	29,7	(5), (12)
	Edificio de oficinas/ Clase	VV/HH	0,5	56,3	18,4	0,56	0,65	4,29	(5)
					18,4	1,6	15,8	26,7	(5), (12)
	Pasillo	VV/HH	0,5	56,3	18,4	0,54	0,72	1,34	(5)
					18,4	0,81	8,9	44,6	(5), (12)
58,7-63,1	Centro de computa- doras	VV	0,22	15,4	15,4	1,0	5,2	10,6	(8)
		VV	0,9	15,4	2,2	1,0	12	37,5	(9)
	Edificio de oficinas ⁽⁶⁾	VV	0,22	Omni	Omni	0,68	1,7	4	(10)
		VV	0,22	Omni	Omni	0,45	1,77	5,2	(11)
59,6- 65,6	Pasillo	VV	0,5	Omni	Omni	1,7	2,6	4,7	caso LoS
	Sala de conferen- cias	VV	0,5	Omni	Omni	8,76	13,17	17,45	caso LoS
	Centro de computa- doras	VV	0,5	Omni	Omni	2,5	6,8	16,4	caso LoS
	Fábrica	VV	0,5	Omni	Omni	5,5 5,5	7,4 11,6	12,5 21,7	(3)
	Edificio de oficinas	VV	0,5	Omni	Omni	5,1 3,5	8,7 10,1	20,9 17,9	(3)

CUADRO 7 (*fin*)

Frec. (GHz)	Entorno	Polari- zación	Resolución del retardo (ns)	Apertura del haz de Tx (grados)	Apertura del haz de Rx (grados)	A (ns)	B (ns)	C (ns)	Nota para A, B, C
67-73	Centro de computadoras	VV/HH	0,5	40	14,4	0,36	0,57	2,4	(5)
					14,4	1,1	10,9	28,1	(5), (12)
	Oficina/ Clase	VV/HH	0,5	40	14,4	0,33	0,5	6,39	(5)
					14,4	1,59	12,6	25,9	(5), (12)
	Pasillo	VV/HH	0,5	40	14,4	0,36	0,47	1,2	(5)
					14,4	0,49	6,11	35,2	(5), (12)
	Fábrica	VV	0,5	18	Omni	0,6 3,9	1,8 10,2	8,2 26,4	(3), (5)
	Centro de computadoras	VV	0,5	18	Omni	6,5 6,6	10,1 13,8	17,1 24,1	(3), (5)
	Pasillo	VV	0,5	Omni	Omni	1,7	7,6	14,9	caso LoS
	Sala de conferencias	VV	0,5	Omni	Omni	7,59	13,71	20,06	caso LoS
	Centro de computadoras	VV	0,5	Omni	Omni	5,8	15,0	30,3	caso LoS
	Fábrica	VV	0,5	Omni	Omni	4,4 6,2	11,1 14,7	17,3 22,8	(3)
	Edificio de oficinas	VV	0,5	Omni	Omni	3,2 5,9	7,0 9,1	13,6 16,8	(3)

(1) Las antenas de transmisión y recepción se encuentran a la altura del techo de 2,6 m.

(2) Las antenas de transmisión y recepción se encuentran a la altura de escritorio de 1,5 m.

(3) Los valores superior e inferior corresponden a casos LoS y NLoS, respectivamente.

(4) Valor medio de VV, VH, HV y HH.

(5) Umbral de 20 dB.

(6) Umbral de 25 dB.

(7) Umbral de 30 dB.

(8) Umbral de 30 dB, el receptor apunta hacia el transmisor.

(9) Umbral de 20 dB, la antena receptora con rotación de 360 grados.

(10) Las Tx y Rx son antenas de transmisión de cuerpo a cuerpo.

(11) Las Tx y Rx son antenas de transmisión de cuerpo a otro dispositivo externo.

(12) La antena de recepción se giró en pasos de 5 grados sobre 360 grados en las mediciones. El valor representa una dispersión de retardo direccional cuando al eje de puntería del receptor no está alineado con la dirección del transmisor.

Dentro de un determinado edificio la dispersión del retardo tiende a aumentar con la distancia entre las antenas y, por tanto, con la pérdida de transmisión básica. El aumento de la distancia entre las antenas trae consigo una mayor probabilidad de que se obstruya el trayecto y de que la señal recibida consista únicamente en trayectos dispersados.

El valor eficaz de la dispersión del retardo, S , es aproximadamente proporcional a la superficie del suelo, F_s , y está dado por la ecuación (4):

$$10 \log_{10} S = 2,3 \log_{10}(F_s) + 11,0 \quad (4)$$

donde las unidades de F_s y S son m^2 y ns, respectivamente.

Esta ecuación se basa en las mediciones realizadas en la banda de 2 GHz para diversos tipos de salas, como oficina, hall, pasillo y gimnasio. La máxima superficie de suelo considerada para las mediciones fue de 1 000 m^2 . El valor mediano de error de estimación es de -1,6 ns y la desviación típica de 24,3 ns.

Cuando la dispersión del retardo S se representa en dB, la desviación típica de S se encuentra aproximadamente entre 0,7 y 1,2 dB.

4.4 Estadísticas sobre selectividad de frecuencia

La propagación por trayectos múltiples da lugar a una selectividad de frecuencias. La magnitud de la selectividad de frecuencia puede caracterizarse a partir de una anchura de banda coherente, una anchura de banda de desvanecimiento media y una frecuencia de cruce de nivel, según se explica en la Recomendación UIT-R P.1407. Los valores del ancho de banda de desvanecimiento media que disminuyen por debajo del umbral de 6 dB a partir de mediciones realizadas en un entorno interior representativo del entorno de un laboratorio u oficina en la banda 2,38 GHz, y de un estudio de televisión en la banda 2,25 GHz son 27% y 21%, respectivamente. Los correspondientes valores de frecuencia de cruce de nivel son: 0,12 por MHz y 0,24 por MHz.

4.5 Modelos para una instalación determinada

Aunque los modelos estadísticos permiten obtener directrices de planificación, los modelos determinísticos (o para una instalación determinada) son muy útiles para los diseñadores de sistemas. Existen varias técnicas determinísticas para modelar la propagación. En el caso de aplicaciones en interiores, se ha estudiado especialmente la técnica de dominio temporal con diferencias finitas y la técnica de óptica geométrica. Esta última es más eficaz a efectos de cálculo que el dominio temporal con diferencias finitas.

Hay dos enfoques básicos de la técnica de óptica geométrica, a saber, el de imagen y el de lanzamiento de rayos. En el de imagen se utilizan las imágenes del receptor con respecto a todas las superficies reflectantes del entorno. Se calculan las coordenadas de todas las imágenes y, a continuación, se trazan rayos hacia dichas imágenes.

El lanzamiento de rayos consiste en lanzar cierto número de rayos de manera uniforme en el espacio en torno a la antena del transmisor. Los rayos son seguidos hasta que alcanzan el receptor o su amplitud se reduce por debajo de un límite especificado. Comparado con el enfoque de imagen, el de lanzamiento de rayos es más flexible, ya que los rayos difractados y dispersados pueden examinarse junto con las reflexiones especulares. Asimismo, la técnica de partición de rayos o el método de variación, permite ahorrar tiempo de cálculo, cuando se mantiene una resolución adecuada. El enfoque de lanzamiento de rayos es una técnica apropiada para predecir en una zona la respuesta de un canal a los impulsos, mientras que el enfoque de imagen se adapta a la predicción punto a punto.

En los modelos determinísticos se hacen, por regla general, hipótesis sobre los efectos de los materiales de construcción a las frecuencias de que se trate (véase el § 7 relativo a las propiedades de los materiales de construcción). En un modelo para una instalación determinada debería tenerse en cuenta la geometría del entorno, así como la reflexión, la difracción y la transmisión a través de las paredes. La respuesta a los impulsos en un determinado punto viene dada por la siguiente fórmula:

$$h(t) = \sum_{n=1}^N \left[\left(\prod_{u=1}^{M_m} \Gamma_{nu} \times \prod_{v=1}^{M_{pn}} P_{nv} \right) \frac{1}{r_n} \cdot e^{-j\omega\tau_n} \cdot \delta(t - \tau_n) \right] \quad (5)$$

donde:

- $h(t)$: respuesta de impulso
- N : número de rayos incidentes
- M_m : número de reflexiones del rayo n
- M_{pn} : número de penetraciones del rayo n
- Γ_{nu} : coeficiente de reflexión del rayo n contra la u-ésima pared
- P_{nv} : coeficiente de penetración del rayo n por la v-ésima pared
- r_n : longitud del trayecto del rayo n
- τ_n : retardo del rayo n.

Los rayos reflejados por las paredes y otras superficies, o que penetran a través de las mismas, se calculan recurriendo a las ecuaciones de Fresnel. En el § 7 se indican los valores medidos de la permisividad de ciertos materiales de construcción.

Además de los rayos que son reflejados o que penetran descritos en la ecuación (5), habría que incluir también los rayos difractados y dispersados para modelar adecuadamente las señales recibidas. Este caso se da sobre todo en corredores con esquinas y otras situaciones similares de propagación. Es posible aplicar la teoría uniforme de la difracción para calcular los rayos difractados.

5 Efectos de la polarización

En interiores no sólo hay un trayecto directo sino también trayectos reflejados y difractados entre el transmisor y el receptor. Las características de reflexión de los materiales de construcción dependen de la polarización, el ángulo de incidencia y la permisividad compleja de los materiales, como se representa en la fórmula de reflexión de Fresnel. Los ángulos de incidencia de los componentes de trayectos múltiples se distribuyen en función de las estructuras del edificio y el emplazamiento del transmisor y el receptor. En consecuencia, la polarización puede afectar significativamente a las características de propagación en interiores.

5.1 Visibilidad directa

5.1.1 Dispersión del retardo

Es bien sabido que en los canales con visibilidad directa las antenas direccionales reducen la dispersión cuadrática media del retardo en comparación con las antenas omnidireccionales, y que la polarización circular también la reduce con respecto a la polarización lineal. De ahí que en este caso una antena de polarización circular direccional represente un medio eficaz para reducir la dispersión del retardo.

El principal motivo de que la dispersión dependa de la polarización es que, cuando la señal de polarización circular incide en una superficie reflejante con un ángulo de incidencia inferior al ángulo de Brewster, se invierte el sentido de polarización de la señal de polarización circular reflejada. La inversión de la señal de polarización circular en cada reflexión significa que los componentes de trayectos múltiples que llegan después de una reflexión están polarizados ortogonalmente con respecto al componente de visibilidad directa, lo cual elimina una parte considerable de la interferencia por trayectos múltiples. Este efecto es independiente de la frecuencia como se ha predicho teóricamente y ha quedado demostrado en una serie de experimentos sobre propagación en interiores en la gama de 1,3 GHz a 60 GHz, y se aplica tanto en interiores como en exteriores. Como todos los materiales de construcción actuales tienen ángulos de Brewster superiores a 45 grados, los trayectos múltiples debidos a reflexiones puntuales (esto es, la fuente principal de componentes de trayectos múltiples) se suprime, de hecho, en la mayoría de las salas, con independencia de la estructura interior y los materiales de la misma. Las posibles excepciones están constituidas por entornos en que predominan ángulos de incidencia muy grandes en los trayectos múltiples, por ejemplo, en vestíbulos largos. Las variaciones del valor eficaz de la dispersión del retardo en un enlace en movimiento se reducen asimismo al utilizar antenas de polarización circular.

5.1.2 Tasa de discriminación por polarización cruzada

Las componentes de la señal con polarización cruzada se generan por reflexión y difracción. Es bien sabido que las características de la atenuación entre antenas con polarización orthogonal tienen un coeficiente de correlación muy pequeño. Se han elaborado sistemas MIMO (múltiples entradas, múltiples salidas) y técnicas de diversidad de polarización en antenas con polarización orthogonal que emplean estas características de la atenuación. Una de las soluciones para mejorar la potencia recibida es utilizar la técnica de diversidad de polarización, cuyo efecto depende sobremanera de la característica XPR.

Por otra parte, la capacidad del canal puede mejorarse si se seleccionan adecuadamente las componentes de polarización cruzada en los sistemas MIMO. Así pues, la calidad de la comunicación en un sistema inalámbrico puede mejorarse utilizando eficazmente la información relativa a las ondas con polarización cruzada.

En el Cuadro 8 se indican los resultados de la medición de la mediana y el valor medio de XPR en cada entorno.

CUADRO 8
Ejemplos de valores de XPR

Frecuencia (GHz)	Ambiente	Configuración de la antena	XPR (dB)	Observaciones
5,2	Oficina	Caso 1	N/D	Datos medidos
		Caso 2	6,39 (mediana) 6,55 (media)	
		Caso 3	4,74 (mediana) 4,38 (media)	
	Sala de conferencias	Caso 1	8,36 (mediana) 7,83 (media)	
		Caso 2	6,68 (mediana) 6,33 (media)	
		Caso 3	N/D	

Caso 1: Antenas transmisora y receptora situadas por encima de la altura de los obstáculos.

Caso 2: Antena transmisora situada por encima de la altura de los obstáculos y la receptora a una altura similar a la de los obstáculos.

Caso 3: Antenas transmisora y receptora situadas a una altura similar a la de los obstáculos.

5.2 Trayecto obstruido

Cuando el trayecto directo está obstruido, puede ser más complicado determinar la dependencia de la dispersión del retardo con respecto a la polarización y la directividad de la antena que en un trayecto de visibilidad directa. Se dispone de varios resultados de experimentos con trayectos obstruidos pero el resultado obtenido en un experimento a 2,4 GHz indica que la dependencia de la dispersión del retardo con respecto a la polarización y la directividad de la antena en el trayecto obstruido es muy diferente de la correspondiente a un trayecto de visibilidad directa. Por ejemplo, una antena omnidireccional polarizada horizontalmente en el transmisor y una antena receptora de polarización circular direccional arrojan un valor eficaz de las dispersiones del retardo más reducidas y el exceso de retardo máximo más bajo en el trayecto obstruido.

5.3 Orientación del terminal móvil

En los sistemas radioeléctricos portátiles los factores más importantes de la propagación son generalmente la reflexión y la dispersión de la señal. La energía suele dispersarse de la polarización transmitida a polarizaciones ortogonales. En esas condiciones, el acoplamiento de polarización cruzada aumenta la probabilidad de obtener niveles de recepción adecuados en aparatos de radio portátiles orientados aleatoriamente. Las mediciones del acoplamiento de polarización cruzada efectuadas a 816 MHz indican un alto nivel de acoplamiento.

6 Efecto del diagrama de radiación de la antena

Se supone que los sistemas de radiocomunicaciones de ondas milimétricas utilizan antenas directivas y/o varias técnicas de conformación del haz con múltiples sistemas de antenas con el fin de contrarrestar la relativamente elevada pérdida de transmisión básica y establecer enlaces de comunicaciones fiables. Es necesario estudiar la influencia del ancho del haz de la antena en la caracterización de la propagación radioeléctrica.

6.1 Pérdida de potencia recibida debido a la apertura del haz de la antena direccional

Cuando las señales se reciben con una antena de una determinada apertura de haz, el número de componentes de la señal multirayecto se reduce en comparación con una antena receptora omnidireccional. Se produce una pérdida de potencia adicional, que puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$L^{\text{conformaciónhaz}}(d, f, W_\phi) = L^{\text{omni}}(d, f) + \Delta L(W_\phi) \text{ (dB)} \quad (6)$$

donde L^{omni} indica la pérdida de transmisión básica omnidireccional de la ecuación (1) y ΔL se calcula del modo siguiente:

$$\Delta L(W_\phi) = \eta \left(\frac{1}{W_\phi} - \frac{1}{360^\circ} \right), \quad 10^\circ \leq W_\phi \leq 360^\circ \quad (7)$$

siendo W_ϕ la apertura del haz a media potencia (HPBW) de una antena direccional (conformación del haz). En el Cuadro 9 se enumeran los valores de η , que pueden medirse a 28 GHz y 38 GHz en entornos comerciales interiores.

CUADRO 9

**Constante η para la pérdida de potencial adicional debido
a la conformación de la apertura del haz W_ϕ**

Entorno	Frecuencia (GHz)	Tipo de enlace	η
Comercial	28	LoS	28,46
		NLoS	70,54
	38	LoS	26,66
		NLoS	76,77

6.2 Características de la dispersión del retardo y la dispersión angular

Como los componentes de la propagación por trayectos múltiples tienen ángulos de incidencia diferentes, los componentes que quedan fuera del ancho del haz de las antenas se filtran espacialmente si se utilizan antenas direccional, a fin de reducir la dispersión del retardo y la dispersión angular. La medición de la propagación y las simulaciones de trazado de rayos efectuadas a 60 GHz en interiores, con una antena de transmisión omnidireccional y cuatro tipos diferentes de antenas receptoras (omnidireccional, de haz ancho, de bocina normal y de haz estrecho) dirigidas hacia la antena transmisora, revelan que la supresión de los componentes del retardo es más eficaz con aperturas de haz estrechas. En el Cuadro 10 se dan varios ejemplos de cómo depende de la directividad de la antena del valor eficaz de la dispersión estática del retardo no excedida en el percentil del 90% y obtenida con simulaciones de trazado de rayos a 60 GHz en una oficina vacía. Hay que señalar que la reducción del valor eficaz de la dispersión del retardo no siempre es deseable, ya que puede entrañar un aumento de las gamas dinámicas del desvanecimiento de las señales de banda ancha, como resultado de la ausencia inherente de diversidad de frecuencias. Asimismo, hay que señalar que ciertos planes de transmisión se benefician de los efectos de los trayectos múltiples.

CUADRO 10

**Ejemplo de dependencia del valor eficaz de la dispersión del retardo
con respecto a la directividad de la antena**

Frecuencia (GHz)	Antena de transmisión	Anchura de haz de la antena de recepción (grados)	Valor eficaz de la dispersión estática del retardo (percentil de 90%) (ns)	Dimensión de la sala (m)	Observaciones
60	Omnidireccional	Omnidireccional	17	13,5 × 7,8	Trazado de rayos Oficina vacía
		60	16		
		10	5		
		5	1		
		Omnidireccional	22	13,0 × 8,6 Oficina vacía	Trazado de rayos sin visibilidad directa
		60	21		
		10	10		
		5	6		

Los métodos de predicción del retardo y de la dispersión angular con respecto al ancho del haz de la antena se han desarrollado en base a mediciones en un entorno de oficina, pasillo, centro de datos y entorno comercial típicos, en 28, 28,5, 38, 60 y 83,5 GHz. Para deducir las características de la distribución multirayecto de un ancho del haz de antena estrecha a una ancha, se combinaron en potencia, retardos y ángulo, las respuestas impulsivas del canal, recopiladas mediante un sistema de antenas de bocina o rotando una antena de bocina de haz estrecho.

El valor eficaz (valor cuadrático medio, o r.m.s.) de la dispersión del retardo, DS , depende del ancho del haz de media potencia, θ (en grados):

$$DS(\theta) = \alpha \times \log_{10} \theta \quad \text{ns} \quad (8)$$

donde α es un coeficiente del valor eficaz de la dispersión del retardo y el rango de θ está definido en el rango $1^\circ \leq \theta^\circ \leq 360^\circ$. El Cuadro 11 contiene una lista de los valores típicos de los coeficientes y una desviación típica σ en función de las condiciones de cada medición. Los coeficientes de la dispersión del retardo representan situaciones en las cuales los ejes de puntería de las antenas están alineados para recibir un máximo de potencia de recepción en situaciones LoS y NLoS, respectivamente.

CUADRO 11
Coeficientes típicos del valor eficaz de la dispersión del retardo

Condiciones de la medición								Coeficientes del valor eficaz de la dispersión del retardo			
f (GHz)	Entorno	Esce- nario	h_1 (m)	h_2 (m)	Rango (m)	Ancho del haz de transmisión (grados)	Ancho del haz de recepción (grados)	α	σ (ns)		
28	Estación de ferrocarril	LoS	8	1,5	8-80	60	$10^{(3)}$	8,25 ⁽¹⁾	16,11		
		NLoS						37,54 ⁽¹⁾	27,22		
	Terminal de aeropuerto	LoS	2,5	1,6	8-200			7,53 ⁽¹⁾	15,98		
		NLoS						63,9 ⁽¹⁾	96,57		
28,5	Oficina	LoS	2,5	1,6	3,5-15	Omni	$45^{(4)}$	1,33	0,22		
	Pasillo	LoS			6-159			3,96	3,02		
		NLoS			13-37			1,02	0,31		
	38	Estación de ferrocarril	8	1,5	8-80	40	$10^{(3)}$	4,18 ⁽¹⁾	4,33		
		NLoS			8-200			24,85 ⁽¹⁾	28,48		
		LoS	2,5	1,2	7-24			4,46 ⁽¹⁾	14,13		
		NLoS			Omni			54,54 ⁽¹⁾	80,72		
	Oficina	LoS			1,16 ⁽¹⁾			12			
	NLoS	15,13 ⁽¹⁾			21,8						

CUADRO 11 (*fin*)

Condiciones de la medición								Coeficientes del valor eficaz de la dispersión del retardo	
<i>f</i> (GHz)	Entorno	Esce- nario	<i>h</i> ₁ (m)	<i>h</i> ₂ (m)	Rango (m)	Ancho del haz de transmisión (grados)	Ancho del haz de recepción (grados)	α	σ (ns)
60,5	Oficina	LoS	2,5	1,6	3,5-15	180 ⁽²⁾	22,5 ⁽⁵⁾	1,67	1,10
	Pasillo	LoS			11-159			1,20	8,44
		NLoS			13-37			1,38	0,60
	Centro de datos	LoS	2,2	2,2	4-14,5			1,86	0,95
83,5	Oficina	LoS	2,5	1,6	3,5-15	Omni	45 ⁽⁴⁾	2,79	0,91
	Pasillo	LoS			6-159			4,44	1,21
		NLoS			13-37			3,01	1,19

⁽¹⁾ El valor es válido cuando el rango de θ es $10^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$.

⁽²⁾ En las mediciones se utilizó un sistema de ocho antenas de bocina, cada una de ellas con un ancho de haz acimutal de $22,5^\circ$.

⁽³⁾ La antena de bocina de 10° se rotó alrededor de 360 grados en el receptor.

⁽⁴⁾ En el receptor se utilizó un sistema de 16 antenas de bocina, cada una de ellas con un ancho de haz acimutal de 45° .

⁽⁵⁾ En el receptor se utilizó un sistema de 16 antenas de bocina, cada una de ellas con un ancho de haz acimutal de $22,5^\circ$.

El valor eficaz (r.m.s.) de la dispersión angular, *AS*, depende del ancho del haz de media potencia, θ (en grados):

$$AS(\theta) = \alpha \times \theta^{\beta} \quad \text{grados} \quad (9)$$

donde α y β son coeficientes del valor eficaz de la dispersión angular y el rango de θ está definido en el rango $1^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$. El Cuadro 12 contiene una lista de los valores típicos de los coeficientes y una desviación típica σ en base a las condiciones de cada medición. Los coeficientes de la dispersión angular representan situaciones en las cuales los ejes de puntería de las antenas están alineados para recibir un máximo de potencia de recepción en situaciones LoS y NLoS, respectivamente.

CUADRO 12

Coeficientes típicos del valor eficaz de la dispersión angular

Condiciones de la medición								Coeficientes del valor eficaz de la dispersión angular		
<i>f</i> (GHz)	Entorno	Escenario	<i>h</i> ₁ (m)	<i>h</i> ₂ (m)	Rango (m)	Ancho del haz de trans- misión (grados)	Ancho del haz de recep- ción (grados)	α	β	σ (grados)
28	Estación de ferrocarril	LoS	8	1,5	8-80	60	10	0,5 ^{(1), (3)}	0,77	2,3
		NLoS			8-200			0,25 ^{(1), (3)}	1,0	2,32
	Terminal de aeropuerto	LoS	2,5	1,6	3,5-15	Omni	45 ⁽⁶⁾	1,2 ^{(1), (3)}	0,49	2,18
		NLoS			6-159			0,3 ^{(1), (3)}	0,96	3,12
28,5	Oficina	LoS	8	1,5	13-37			0,005 ⁽³⁾ 1,95 ⁽⁴⁾	1,53 0,22	0,91 0,28
	Pasillo	LoS			8-200			0,68 ⁽³⁾ 6,1 ⁽⁴⁾	0,47 0,07	2,15 0,47
		NLoS			7-24			0,115 ⁽³⁾ 0,65 ⁽⁴⁾	0,89 0,34	1,27 0,17
38	Estación de ferrocarril	LoS	8	1,5	8-80	40	10	1,14 ^{(1), (3)}	0,54	3,36
		NLoS			8-200			0,16 ^{(1), (3)}	1,1	3,24
	Terminal de aeropuerto	LoS	2,5	1,2	3,5-15	Omni	10	2,0 ^{(1), (3)}	0,34	1,36
		NLoS			11-159			0,34 ^{(1), (3)}	0,93	2,99
	Oficina	LoS	2,5	1,2	13-37			0,07 ^{(1), (3)}	1,22	5,58
		NLoS			4-14,5			0,17 ^{(1), (3)}	1,07	4,81
60,5	Oficina	LoS	2,5	1,6	3,5-15	180 ⁽²⁾	22,5 ⁽⁷⁾	0,008 ⁽³⁾ 0,8 ⁽⁴⁾	1,44 0,26	0,72 0,08
	Pasillo	LoS			11-159			4e-12 ⁽³⁾ 2,42 ⁽⁴⁾	4,48 0,07	4,42 0,21
		NLoS			13-37			6,425 ⁽³⁾ 0,92 ⁽⁴⁾	0,28 0,25	2,56 0,19
	Centro de datos	LoS	2,2	2,2	4-14,5			0,094 ⁽³⁾ 1,83 ⁽⁴⁾	0,99 0,14	1,47 0,14
83,5	Oficina	LoS	2,5	1,6	3,5-15	Omni	45 ⁽⁶⁾	0,038 ⁽³⁾ 1,05 ⁽⁴⁾	1,19 0,28	0,62 0,19
	Pasillo	LoS			6-159			0,13 ⁽³⁾ 2,9 ⁽⁴⁾	0,89 0,16	1,71 0,29
		NLoS			13-37			0,084 ⁽³⁾ 0,96 ⁽⁴⁾	1,05 0,31	1,01 0,23

⁽¹⁾ El valor es válido cuando el rango de θ es $10^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$.

⁽²⁾ En las mediciones se utilizó un sistema de ocho antenas de bocina, cada una de ellas con un ancho de haz acimutal de $22,5^\circ$.

⁽³⁾ Dispersión angular en la dirección de acimut.

⁽⁴⁾ Dispersión angular en la dirección de elevación.

⁽⁵⁾ La antena de bocina de 10° se rotó alrededor de 360° en el receptor.

⁽⁶⁾ En el receptor se utilizó un sistema de 16 antenas de bocina, cada una de ellas con un ancho de haz acimutal de 45° .

⁽⁷⁾ En el receptor se utilizó un sistema de 16 antenas de bocina, cada una de ellas con un ancho de haz acimutal de $22,5^\circ$.

7 Efectos de la ubicación del transmisor y el receptor

Se han hecho sólo unas pocas investigaciones experimentales y teóricas sobre los efectos de la ubicación del transmisor y el receptor sobre las características de propagación en interiores. Sin embargo, en general puede decirse que la estación de base debe situarse lo más alto posible cerca del techo de la sala para alcanzar trayectos de visibilidad directa lo más lejos posible. Tratándose de terminales portátiles, es evidente que la posición del terminal de usuario dependerá del movimiento del usuario más que de las limitaciones inherentes del diseño del sistema. Sin embargo, en el caso de los terminales portátiles se sugiere que la antena esté situada a una altura suficiente para garantizar visibilidad directa con la estación de base, siempre que sea posible.

Asimismo, la elección del emplazamiento de la estación es un factor muy importante de los parámetros de configuración del sistema como, por ejemplo, los arreglos de diversidad espacial, la configuración de la zona, etc.

8 Efectos de los materiales de construcción, los acabados y el mobiliario

Las características de propagación en interiores se ven afectadas por la reflexión en los materiales de construcción y la transmisión a través de éstos. Las características de reflexión y transmisión de esos materiales dependen de la permisividad compleja de los mismos. Es probable que los modelos de predicción de la propagación para una ubicación determinada necesiten que se introduzcan datos básicos con información sobre la permisividad compleja de los materiales de construcción y sobre la estructura del edificio, y dicha información se encuentra disponible en la Recomendación UIT-R P.2040.

Las reflexiones especulares de los materiales del suelo tales como entarimado de suelo y placas de hormigón se reducen considerablemente en las bandas de ondas milimétricas cuando los materiales se recubren con alfombras de superficie rugosa. Pueden obtenerse disminuciones similares poniendo cortinas en las ventanas. En consecuencia, cabe esperar que los efectos propios de los materiales cobren importancia a medida que aumenta la frecuencia.

Además de las estructuras esenciales del edificio, el mobiliario y otros accesorios pueden afectar también significativamente a las características de propagación en interiores. Pueden considerarse como obstrucciones y se consideran en el modelo de pérdida de transmisión básica del § 3.

9 Efecto de los movimientos de los objetos en una sala

El movimiento de personas y objetos en una sala ocasiona variaciones temporales de las características de propagación en interiores. Sin embargo, estas variaciones son muy lentas en comparación con la velocidad de datos utilizada normalmente y, en consecuencia, pueden considerarse prácticamente como una variable aleatoria independiente del tiempo. Aparte de las personas situadas a proximidad de las antenas o en el trayecto directo, el movimiento de las personas en las oficinas y otros lugares dentro y fuera del edificio tienen un efecto deseñable en las características de propagación.

Las mediciones efectuadas con ambos terminales del enlace en posición fija indican que el desvanecimiento se produce en ráfagas (los datos estadísticos recogidos tienen un carácter marcadamente no estacionario), y se debe bien a la perturbación de las señales de trayectos múltiples en las zonas que rodean a un determinado enlace, o al ensombrecimiento provocado por el paso de personas a través del enlace.

Las mediciones realizadas a 1,7 GHz indican que una persona que se introduce en el trayecto de una señal de visibilidad directa ocasiona una disminución de 6 a 8 dB del nivel de potencia recibida, y

que el valor K de la distribución de Nakagami-Rice se reduce considerablemente. En condiciones sin visibilidad directa, el movimiento de personas cerca de las antenas no afecta apreciablemente al canal.

En el caso de un terminal portátil, la proximidad de la cabeza y el cuerpo del usuario afecta al nivel de la señal recibida. A 900 MHz y con una antena dipolo, las mediciones revelan que la intensidad de la señal recibida se reduce de 4 a 7 dB cuando el terminal se mantiene a nivel de la cintura, y de 1 a 2 dB cuando el terminal se mantiene a la altura de la cabeza del usuario, con respecto a la intensidad de la señal recibida cuando la antena está situada a varias longitudes de onda del cuerpo.

Cuando la altura de la antena es inferior a 1 m aproximadamente, por ejemplo, en el caso de una aplicación característica de ordenador portátil o de mesa, el trayecto de visibilidad directa puede verse ensombrecido por personas que se desplazan en la vecindad del terminal del usuario. Para estas aplicaciones de datos revisten interés tanto la profundidad como la duración de los desvanecimientos. Las mediciones efectuadas a 37 GHz en un entorno de oficina interior han demostrado que con frecuencia se observan desvanecimientos de 10 a 15 dB. La duración de estos desvanecimientos debidos al ensombrecimiento producido por los cuerpos de personas que se mueven continuamente de manera aleatoria a través del trayecto con visibilidad directa sigue una distribución log-normal, en virtud de la cual la desviación media y normalizada dependen de la profundidad del desvanecimiento. Para esas mediciones, a una profundidad de desvanecimiento de 10 dB, la duración media fue de 0,11 s y la desviación normalizada de 0,47 s. A una profundidad de desvanecimiento de 15 dB, la duración media fue de 0,05 s y la desviación normalizada de 0,15 s.

Las mediciones a 70 GHz han demostrado que la duración media del desvanecimiento debida al apantallamiento de un cuerpo es de 0,52 s, 0,25 s y 0,09 s para una profundidad de desvanecimiento de 10 dB, 20 dB y 30 dB, respectivamente, estimándose la velocidad media del movimiento de las personas a 0,74 m/s en direcciones aleatorias, y suponiendo que el grosor del cuerpo humano es de 0,3 m.

Las mediciones indican que el número medio de sucesos de apantallamiento de un cuerpo en una hora causado por el movimiento humano en un entorno de oficina puede obtenerse con la fórmula:

$$\bar{N} = 260 \times D_p \quad (10)$$

donde D_p ($0,05 \leq D_p \leq 0,08$) es el número de personas por metro cuadrado en la sala. Por consiguiente, la duración total del desvanecimiento por hora se obtiene con la fórmula:

$$T = \bar{T}_s \times \bar{N} \quad (11)$$

donde \bar{T}_s es la duración media del desvanecimiento.

El número de sucesos de apantallamiento de un cuerpo en una hora en una sala de exposiciones es de 180 a 280, siendo D_p de 0,09 a 0,13.

La dependencia de las pérdidas de transmisión básicas con respecto a la distancia en una sala subterránea se ve afectada por el apantallamiento de cuerpos humanos. Las pérdidas de transmisión básicas en una sala subterránea pueden estimarse mediante la siguiente ecuación, utilizando los parámetros del Cuadro 13.

$$L(x) = -10 \cdot \alpha \{1,4 - \log_{10}(f) - \log_{10}(x)\} + \delta \cdot x + C \quad \text{dB} \quad (12)$$

donde:

f : frecuencia (MHz)

x : distancia (m).

Los parámetros en el caso sin visibilidad directa se verifican en la banda de 5 GHz, y los del caso LOS son aplicables a la gama de frecuencias de 2 GHz a 20 GHz. La distancia x oscila entre 10 m y 200 m.

El entorno de una sala subterránea es de tipo compartimentado, formado por pasillos rectos con paredes de vidrio o cemento armado. El pasillo principal tiene 6 m de ancho, 3 m de alto y 190 m de largo. Se supone que un cuerpo humano típico mide 170 cm de altura y su envergadura entre los hombros es de 45 cm. La densidad de los pasantes es de aproximadamente 0,008 persona/m² y 0,1 persona/m² en un periodo de calma (temprano por la mañana o en horas bajas) y en periodo agitado (hora de comer o en horas punta), respectivamente.

CUADRO 13

Parámetros para modelar la función de pérdidas de transmisión básicas en la sala subterránea Yaesu

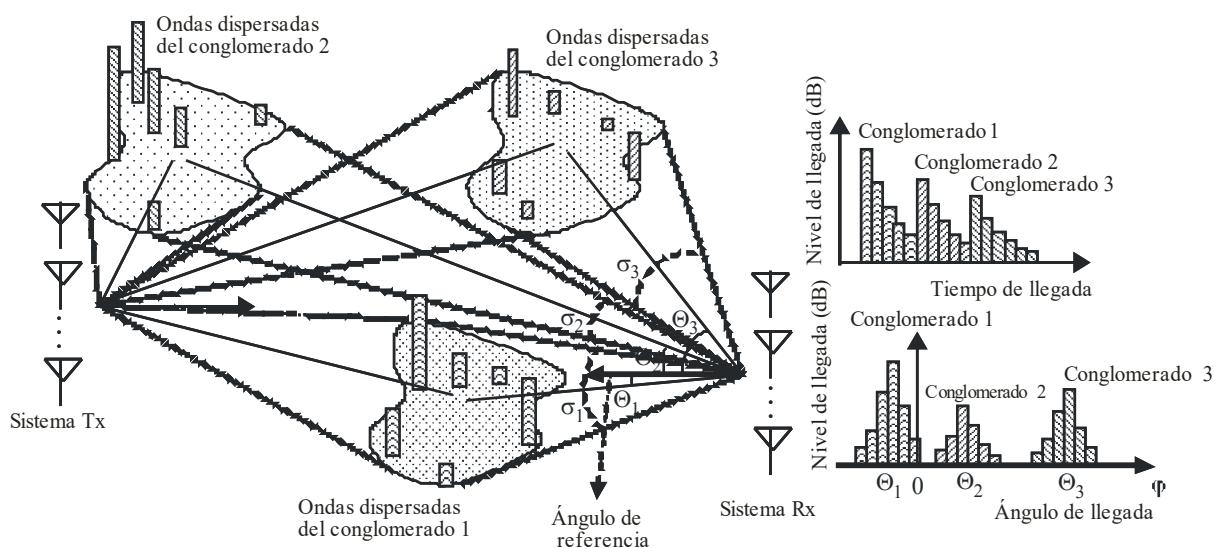
	Visibilidad directa			Sin visibilidad directa		
	α	δ (m ⁻¹)	C (dB)	α	δ (m ⁻¹)	C (dB)
Hora baja	2,0	0	-5	3,4	0	-45
Hora punta	2,0	0,065	-5	3,4	0,065	-45

10 Modelos de dispersión angulares

10.1 Modelo de conglomerado

En un modelo de propagación para sistemas de banda ancha que utilizan sistemas de antenas, se puede aplicar un modelo de conglomerado que combina las distribuciones temporal y angular. El conglomerado abarca las ondas dispersas que llegan al receptor dentro de un ángulo y un tiempo limitado, según se ilustra en la Fig. 1. En el § 4 se indican las características de retardo temporal. La distribución del ángulo de llegada del conglomerado Θ_i basado en el ángulo de referencia (que se podría elegir arbitrariamente) para un entorno de interiores se expresa aproximadamente mediante una distribución uniforme en $[0, 2\pi]$.

FIGURA 1
Imagen de un modelo de conglomerado



Θ_i : Ángulo de llegada de conglomerado, i

σ_i : Desviación normalizada de la dispersión angular dentro de un conglomerado, i

P.1238-01

10.2 Distribución angular de las ondas de llegada dentro del conglomerado i -ésimo

La función de densidad de probabilidad de la distribución angular de las ondas de llegada dentro de un conglomerado se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$P_i(\varphi - \Theta_i) = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma_i} \cdot \exp\left(-\sqrt{2} \frac{|\varphi - \Theta_i|}{\sigma_i}\right) \quad (13)$$

siendo φ el ángulo de llegada de las ondas de llegada dentro de un conglomerado en grados con referencia al ángulo de referencia y σ_i la desviación normalizada de la dispersión angular (grados).

En el Cuadro 14 se indican los parámetros de la dispersión angular en un entorno en interiores.

CUADRO 14
Parámetros de la dispersión angular en un entorno en interiores

	Visibilidad directa		Sin visibilidad directa	
	Media (grados)	Gama (grados)	Media (grados)	Gama (grados)
Sala	23,7	21,8-25,6	—	—
Oficina	14,8	3,93-28,8	54,0	54
Hogar	21,4	6,89-36	25,5	4,27-46,8
Corredor	5	5	14,76	2-37

10.3 Dispersión angular de doble dirección

En un modelo de propagación para comunicación de banda ancha con múltiples sistemas de antenas en el transmisor y el receptor, se puede aplicar una distribución angular en las estaciones transmisoras y receptoras. En el Cuadro 15 figura el valor eficaz promedio de la dispersión angular en un pasillo interno y en un entorno de oficinas para un umbral de 20 dB, a partir de mediciones con un ancho de banda de 240 MHz en la frecuencia 2,38 GHz.

CUADRO 15
Dispersión angular de doble dirección

	Altura estación 1 (m)	Valor eficaz de la dispersión angular en la estación 1 (grados)	Altura estación 2 (m)	Valor eficaz de la dispersión angular en la estación 2 (grados)
Pasillo y oficina	1,9	68,5	1,7	69,7

11 Modelo estadístico en caso de utilización estática

Cuando los terminales inalámbricos, tales como teléfonos celulares y redes inalámbricas de área local (WLAN), se utilizan en interiores, su posición suele ser estática. En este caso, el terminal inalámbrico no se mueve, pero el entorno que lo rodea cambia debido al movimiento de objetos que bloquean las señales, como por ejemplo personas. Para calcular con precisión la calidad de la comunicación en este entorno proporcionamos un modelo de canal para condiciones estáticas en interiores, que presenta las características estadísticas de la función de densidad de probabilidad (FDP) y la función de autocorrelación de la variación del nivel recibido al mismo tiempo.

Se analizan los modelos de canales para entornos sin y con visibilidad directa en interiores.

11.1 Definición

- $N_{persona}$: número de personas en movimiento
- Δw : diámetro equivalente a una persona en movimiento (m)
- v : velocidad de desplazamiento de la persona (m/s)
- P_m : potencia total de trayectos múltiples
- $S(x,y)$: disposición de la zona de movimiento
- f_T : desplazamiento máximo de frecuencia para el terminal móvil estático.
- r_p : potencia recibida en el terminal móvil
- f : frecuencia (Hz)
- $p(r_p,k)$: función de densidad de probabilidad (FDP) de la potencia recibida, definida como una distribución Nakagami-Rice con el factor K
- K : factor K definido en la distribución Nakagami-Rice
- $R(\Delta t)$: función de autocorrelación de la función al nivel recibido
- $R_N(\Delta t)$: coeficiente de correlación al nivel recibido
- $P(f)$: espectro de potencias
- $P_N(f)$: espectro de potencias normalizado a la potencia $P(0)$.

11.2 Modelo del sistema

En la Fig. 2 se muestra el modelo de sistema. Se considera que los únicos objetos que se mueven son personas; la i -ésima persona se representa por un disco de diámetro Δw (m) separado del terminal móvil (TM) una distancia r_i (m). Cada persona camina en dirección aleatoria entre 0 y 2π a una velocidad constante de v (m/s) y se desplaza dentro de una superficie arbitraria $S(x,y)$ alrededor del TM. El número de personas que se mueven es $N_{persona}$ y cada una de ellas absorbe una parte de la energía de los trayectos que atraviesan su anchura, Δw . Los trayectos múltiples llegan al terminal de manera uniforme desde todas las direcciones horizontales. En las Figs. 3 y 4 se muestra una representación típica de las habitaciones consideradas, rectangulares y circulares, respectivamente.

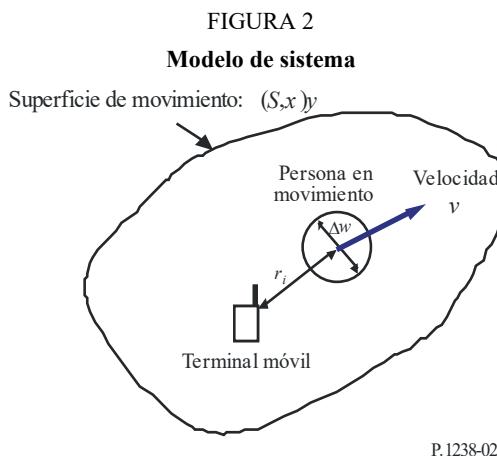
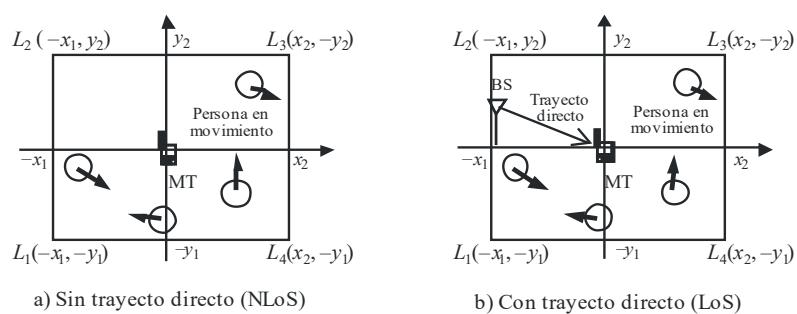
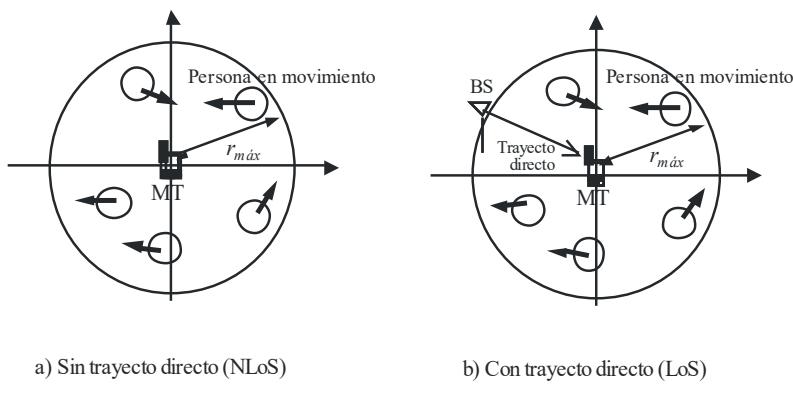


FIGURA 3
Disposición en una habitación rectangular



P.1238-03

FIGURA 4
Disposición en una habitación circular



P.1238-04

11.2.1 Función de densidad de probabilidad de la potencia recibida

La FDP de la potencia recibida r_p en el terminal móvil viene dada por la distribución Nakagami-Rice siguiente:

$$p(r_p, K) = (K + 1) \exp[-(K+1)r_p - K] I_0(\sqrt{4(K+1)Kr_p}) \quad (14)$$

siendo $I_0(x)$ la primera función Bessel modificada de orden 0 y K el siguiente factor:

$$K \equiv K(x) = \left| e_{Directa}(x) + e_s(x) \right|^2 \Bigg/ \left(\frac{N_{persona} P_m \Delta w S_{Forma}}{2\pi} \right) \quad (15)$$

donde:

$$S_{Forma} = \begin{cases} \frac{1}{(x_2 + x_1)(y_2 + y_1)} \begin{pmatrix} -y_1 \log(-x_1 + \sqrt{x_1^2 + y_1^2}) - x_1 \log(-y_1 + \sqrt{x_1^2 + y_1^2}) \\ + y_1 \log(x_2 + \sqrt{x_2^2 + y_1^2}) - x_2 \log(-y_1 + \sqrt{x_2^2 + y_1^2}) \\ - y_2 \log(-x_1 + \sqrt{x_1^2 + y_2^2}) + x_1 \log(y_2 + \sqrt{x_1^2 + y_2^2}) \\ + y_2 \log(x_2 + \sqrt{x_2^2 + y_2^2}) + x_2 \log(y_2 + \sqrt{x_2^2 + y_2^2}) \end{pmatrix} & \text{(para una habitación rectangular)} \\ \frac{2}{r_{max}} & \text{(para una habitación circular)} \end{cases} \quad (16)$$

En esta ecuación $e_{Directo}(x)$ representa la envolvente compleja del trayecto directo y $e_s(x)$ la envolvente compleja de trayectos múltiples sin objetos en movimiento alrededor del TM en la posición x , que depende sólo del entorno estático que lo rodea; sus valores no dependen del tiempo t . P_m representa la potencia total de los múltiples trayectos. S_{Forma} es un valor constante que queda determinado por la forma y dimensiones de la habitación.

11.2.2 Función de autocorrelación del nivel de señal recibido

La función de autocorrelación $R(\Delta t)$ del nivel de la señal compleja recibida en el intervalo de tiempo Δt viene dado por la siguiente expresión:

$$R(\Delta t) = \begin{cases} P_m \left[\frac{|e_{Directo}(x) + e_s(x)|^2}{P_m} + \frac{N_{persona} \Delta w S_{Forma}}{2\pi} \left(1 - \frac{2f_T |\Delta t|}{\pi} \right) \right] & (v|\Delta t| \leq \Delta w) \\ P_m \left[\frac{|e_{Directo}(x) + e_s(x)|^2}{P_m} + \frac{N_{persona} \Delta w S_{Forma}}{2\pi} \left\{ 1 - \frac{2f_T |\Delta t|}{\pi} - \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{1}{f_T |\Delta t|} \right) + \frac{2f_T |\Delta t|}{\pi} \sin \left(\cos^{-1} \left(\frac{1}{f_T |\Delta t|} \right) \right) \right\} \right] & (v|\Delta t| \geq \Delta w) \end{cases} \quad (17)$$

siendo:

$$f_T = v / \Delta w \quad (18)$$

En esta ecuación f_T viene dado por la velocidad de desplazamiento v y el ancho Δw de la persona en movimiento y puede considerarse como el desplazamiento máximo de frecuencia para el terminal móvil estático.

11.2.3 Espectro de potencia de la señal recibida

El espectro de potencia $P(f)$ en función de la frecuencia, que determina la variación de la envolvente compleja, viene dado por la transformada de Fourier de la función de autocorrelación $R(\Delta t)$ indicada en la ecuación (17), esto es:

$$P(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\Delta t) e^{-j2\pi f \Delta t} d\Delta t \quad (19)$$

El espectro de potencia $P_N(f)$, normalizado a la potencia $P(0)$ a la frecuencia $f=0$ Hz, puede aproximarse por el siguiente valor.

$$P_N(f) = P(f)/P(0)$$

$$\approx \frac{K(x)\delta(f)}{K(x)=0,02f_T^{-0,87}} \times \begin{cases} \left((1 - 0,78f_T^{-0,21})\delta(f) + 0,78f_T^{0,21} \exp(-5,3|f|/f_T) \right) \left(|f| \leq \frac{f_T}{\sqrt{2}} \right) \\ 0,0092f_T^{1,8}|f|^{-2} \quad \left(|f| > \frac{f_T}{\sqrt{2}} \right) \end{cases} \quad (20)$$

siendo $\delta(f)$ la función delta de Dirac.

11.2.4 Valores

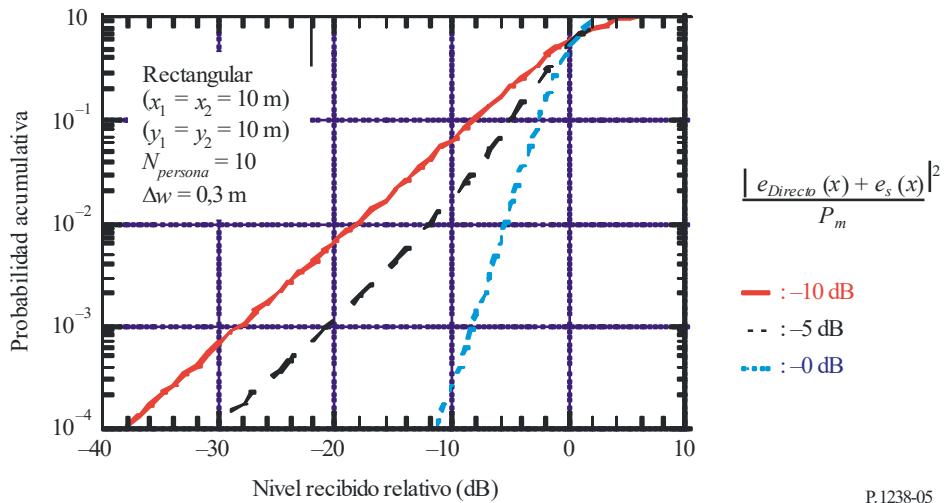
Se recomienda un valor de Δw igual a 0,3 m, que es representativo de un hombre adulto medio.

11.2.5 Ejemplos

Suponiendo Δw , v y $N_{persona}$ igual a 0,3 m, 1 m/s, y 10, respectivamente, y $r_{máx}$ igual 10 m en el caso de la sala circular, los valores de la FDP $p(r_p, K(x))$, la función de autocorrelación $R_N(\Delta t)$ y el espectro de potencia $P_N(f)$, obtenidos a partir de las ecuaciones (14), (15) y (20), se indican en las Figs. 5, 6 y 7, respectivamente.

FIGURA 5

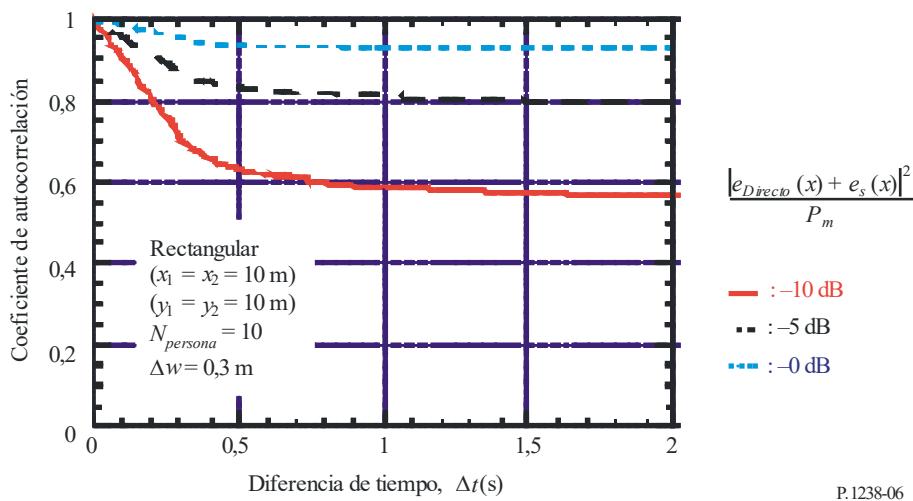
Probabilidad acumulativa del nivel recibido en una sala circular



P.1238-05

FIGURA 6

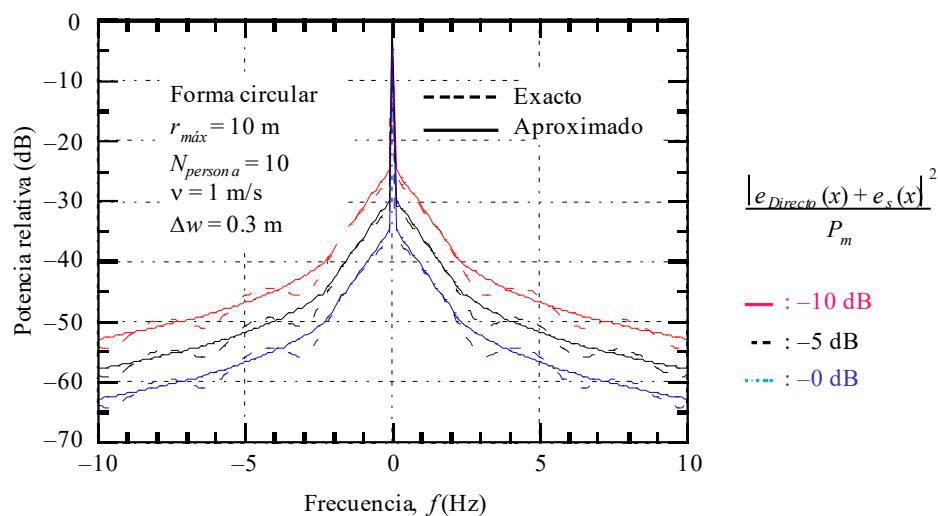
Coeficiente de autocorrelación del nivel recibido en una sala circular



P.1238-06

FIGURA 7

Espectro de potencia en una sala circular



P.1238-13