

Recomendación UIT-R P.2109-2

(08/2023)

Serie P: Propagación de las ondas radioeléctricas

Predicción de las pérdidas debidas a la penetración en edificios



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 <http://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, 2023

© UIT 2023

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.2109-2

Predicción de las pérdidas debidas a la penetración en edificios

(2017-2019-2023)

Cometido

En esta Recomendación se describe un método para calcular las pérdidas debidas a la penetración en edificios a frecuencias comprendidas entre 80 MHz y 100 MHz para probabilidades de $0,0 < P < 1,0$. El método no depende del emplazamiento y está destinado principalmente para su utilización en estudios de compartición y compatibilidad.

Palabras clave

Edificio, interferencia, interior, penetración, propagación

Abreviaturas

BEL Pérdidas debidas a la penetración en edificios (*building entry loss*)

CW Onda continua (*continuous wave*)

LoS Línea de visibilidad directa (*line of sight*)

Recomendaciones e Informes de la UIT conexos

Recomendación UIT-R P.2040

Informe UIT-R P.2346

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que para la planificación de sistemas y la evaluación de interferencia podría ser necesario tener en cuenta la atenuación de las ondas radioeléctricas que se produce al atravesar edificios;
- b) que es preciso dar directrices a los ingenieros para estimar la cobertura o predecir la interferencia por sistemas en el exterior a sistemas en el interior y viceversa,

reconociendo

- a) que la Recomendación UIT-R P.2040 ofrece directrices sobre los efectos de los materiales de construcción y las estructuras en las ondas radioeléctricas;
- b) que el Informe UIT-R P.2346 contiene datos empíricos recabados sobre las pérdidas debidas a la penetración en edificios,

recomienda

1 que se utilice el modelo del Anexo 1 para calcular las pérdidas debidas a la penetración en edificios;

2 que, en el Anexo 2, se definan los distintos tipos de pérdidas en términos de propagación asociadas a los edificios y se faciliten orientaciones sobre la medición de las pérdidas debidas a la penetración en edificios.

NOTA – Los estudios de compartición realizados por el UIT-R en relación con distintos puntos del orden del día de la CMR-19 se basaron en el texto de la presente Recomendación que estaba en vigor en el momento de esas actividades o en el momento de realizar la actividad.

Anexo 1

1 Introducción

En este Anexo se describe un modelo para calcular las pérdidas debidas a la penetración en edificios (*building entry loss*, BEL), como se define en la Recomendación UIT-R P.2040. El resultado del modelo es una función de distribución acumulativa de la probabilidad de que no se rebase un determinado valor de pérdidas.

El modelo no pretende separar las pérdidas que sufre la señal al penetrar un muro exterior de la atenuación producida al atravesar todo el edificio. Se ha adoptado este planteamiento porque se considera improbable que, en el contexto de los estudios del UIT-R, se disponga con suficiente detalle de información específica del edificio.

Las pérdidas al penetrar edificios son muy variables, tanto dentro de un mismo edificio como entre edificios diferentes. Técnicas como el trazado de rayos han demostrado ser útiles para hacer predicciones específicas en un determinado emplazamiento cuando se complementan con datos detallados sobre la arquitectura, pero dichos modelos no suelen resultar adecuados para aplicaciones genéricas como los estudios de compartición del espectro.

Un modelo estadístico que trate de describir las características de penetración de un conjunto general de edificios daría lugar a una distribución estadística tan amplia que resultaría inservible. Por el contrario, un modelo que trate de caracterizar diferentes tipos de edificios exigiría muchísimos más datos de los existentes y sería inadecuado para estudios de compartición genéricos.

NOTA – Los tipos de edificio a los que se refiere esta Recomendación deben examinarse con cuidado.

El modelo aquí descrito se basa en datos medidos recopilados en el Informe UIT-R P.2346 en la gama 80 MHz a 73 GHz. El modelo puede utilizarse en el contexto de un método Monte Carlo, pero cabe señalar que el modelo sólo ha sido validado respecto de datos empíricos en el rango de probabilidad de 0,01 a 0,99.

2 Parámetros

El modelo emplea los siguientes parámetros:

- frecuencia (~0,08-100 GHz);
- probabilidad de que no se rebase un nivel de pérdidas determinado;
- clase de edificio («tradicional» o «con eficiencia térmica»);
- ángulo de elevación del trayecto en la fachada del edificio (grados respecto de la horizontal).

No se tiene en cuenta explícitamente el acimut del trayecto hacia el terminal exterior con respecto a la superficie del edificio. Aunque la teoría y los datos medidos muestran que las señales que inciden perpendicularmente sobre la superficie de un edificio sufrirán menor atenuación que las que inciten a ángulos oblicuos, el resultado estadístico del modelo representa todas las orientaciones del edificio respecto del terminal exterior.

En el modelo básico se parte del supuesto de que la antena interior es omnidireccional y que las pérdidas debidas a la penetración en el edificio tienen en cuenta toda la energía que llega al emplazamiento del terminal. En algunos casos, el terminal interno puede utilizar una antena direccional que actuará como filtro espacial, aumentando la aparente pérdida de entrada en el edificio dado que la energía que llega de algunas direcciones es rechazada. Las mediciones realizadas en dos grandes edificios de la República de Corea a 32 GHz mostraron que la pérdida de entrada en el edificio, medida con antenas de ancho de haz de 10 grados, era 5,3 dB mayor que en el caso omnidireccional. En el Informe UIT-R P.2346 figuran más detalles al respecto.

De conformidad con la definición dada en la Recomendación UIT-R P.2040, la atenuación debida a la entrada en edificios se define sin tener en cuenta la ocupación del suelo en los alrededores. Si el edificio estuviese rodeado de un obstáculo local, tendrán que determinarse las pérdidas adicionales para la altura del terminal y la posición por encima del suelo utilizando la Recomendación UIT-R P.2108.

El modelo parte del supuesto implícito de que los terminales tienen idéntica probabilidad de encontrarse en cualquier lugar dentro del edificio.

2.1 Clasificación de tipos de edificios

Los resultados experimentales, como los recabados en el Informe UIT-R P.2346, muestran que los edificios pueden clasificarse en dos categorías distintas en función de las pérdidas por penetración: cuando los edificios se han construido utilizando métodos modernos de aislamiento térmico (vidrio metalizado, paneles de aluminio laminado) las pérdidas son considerablemente mayores que en edificios «tradicionales» sin este tipo de materiales. Por consiguiente, el modelo ofrece predicciones para estos dos casos.

Esta clasificación, «eficiencia térmica» y «tradicional», se refiere meramente a la eficiencia térmica de los materiales de construcción. No debe presumirse nada sobre el año o tipo de construcción (una o varias alturas), patrimonio o método de construcción.

Al calcular las pérdidas debidas a la penetración en edificios, es importante tener en cuenta la eficiencia térmica de todo el edificio (la eficiencia térmica general). Una estructura principal con alta eficacia térmica pero con ventanas mal aisladas (por ejemplo, un solo vidrio de cristal simple delgado) puede hacer que el edificio sea térmicamente ineficiente y viceversa.

La transmitancia térmica, conocida como valor U, ofrece una descripción cuantificable de la eficiencia térmica. Valores U pequeños representan una alta eficiencia térmica. Normalmente, las ventanas de vidrio metalizado, paredes huecas aisladas, hormigón armado grueso y revestimiento de láminas de metal son un buen indicio¹ de que el edificio tiene eficiencia térmica.

3 Modelo

Las pérdidas por penetración en edificios varían según el tipo de edificio, ubicación dentro del edificio y movimiento en el edificio. La distribución de las pérdidas por penetración en el edificio viene dada por dos distribuciones log-normales. Las pérdidas por penetración en el edificio no rebasadas para la probabilidad, P , vienen dadas por:

$$L_{BEL}^{omni}(P) = 10\log(10^{0,1A(P)} + 10^{0,1B(P)} + 10^{0,1C}) \text{ dB} \quad (1)$$

siendo:

$$A(P) = F^{-1}(P)\sigma_1 + \mu_1 \quad (2)$$

$$B(P) = F^{-1}(P)\sigma_2 + \mu_2 \quad (3)$$

$$C = -3,0 \quad (4)$$

$$\mu_1 = L_h + L_e \quad (5)$$

$$\mu_2 = w + x \log(f) \quad (6)$$

$$\sigma_1 = u + v \log(f) \quad (7)$$

¹ Por ejemplo, valores $U < 0,3$ y $< 0,9$ son representativos de estructura principal con eficiencia térmica y vidrio metalizado, respectivamente.

$$\sigma_2 = y + z \log(f) \quad (8)$$

donde:

L_h : pérdida mediana para trayectos horizontales, a saber:

$$L_h = r + s \log(f) + t (\log(f))^2 \quad (9)$$

L_e : corrección para el ángulo de elevación del trayecto en la fachada del edificio:

$$L_e = 0,212 |\theta| \quad (10)$$

y:

f : frecuencia (GHz)

θ : ángulo de elevación del trayecto en la fachada del edificio (grados)

P : probabilidad de que no se rebasen las pérdidas ($0,0 < P < 1,0$)

$F^{-1}(P)$: distribución acumulativa normal inversa como función de probabilidad.

Los coeficientes se indican en el Cuadro 1.

CUADRO 1
Coeficientes del modelo

Tipo de edificio	r	s	t	u	v	w	x	y	z
Relacionado con:	μ_1			σ_1		μ_2		σ_2	
Tradicional	12,64	3,72	0,96	9,6	2,0	9,1	-3,0	4,5	-2,0
Eficiencia térmica	28,19	-3,00	8,48	13,5	3,8	27,8	-2,9	9,4	-2,1

A título ilustrativo, la Fig. 1 representa la pérdida por penetración en edificios obtenida mediante el modelo para los dos tipos de edificios. En los estudios de compartición se debe considerar siempre la distribución total. En la Fig. 2 se puntea la función de distribución cumulativa para la pérdida por penetración en edificios predicha con una incidencia horizontal.

FIGURA 1

Pérdidas medias por penetración en edificios con una incidencia horizontal

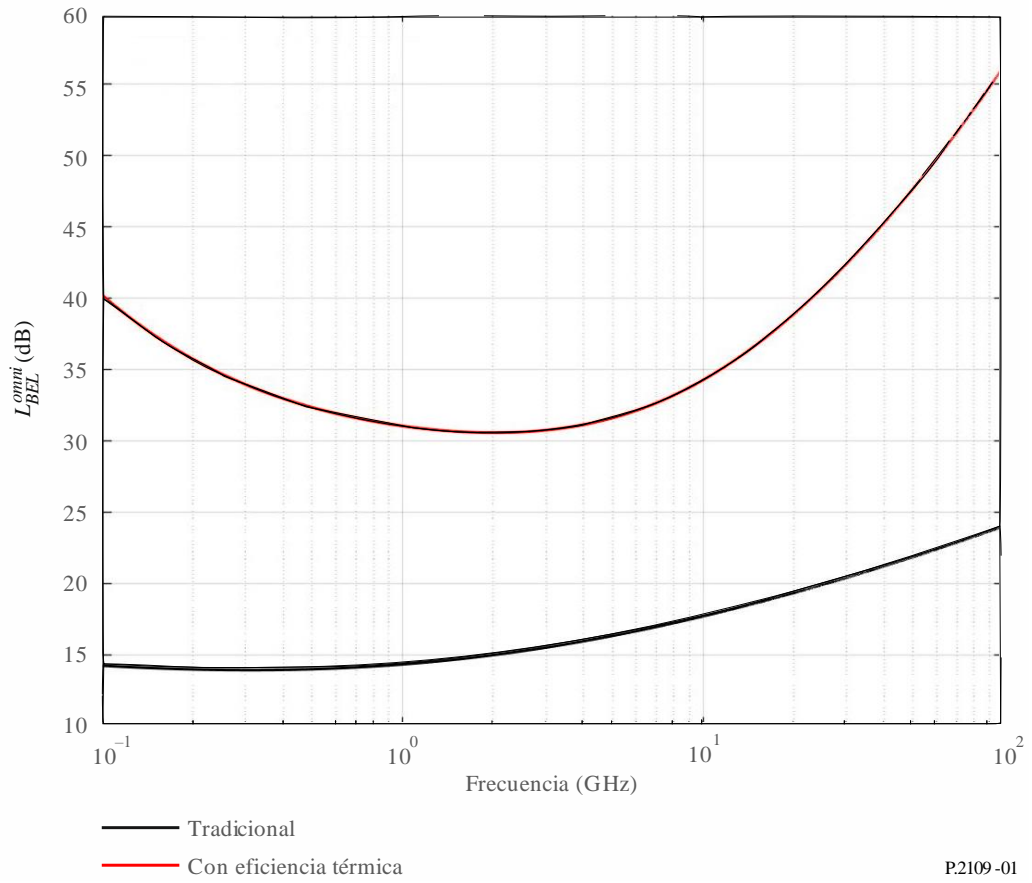
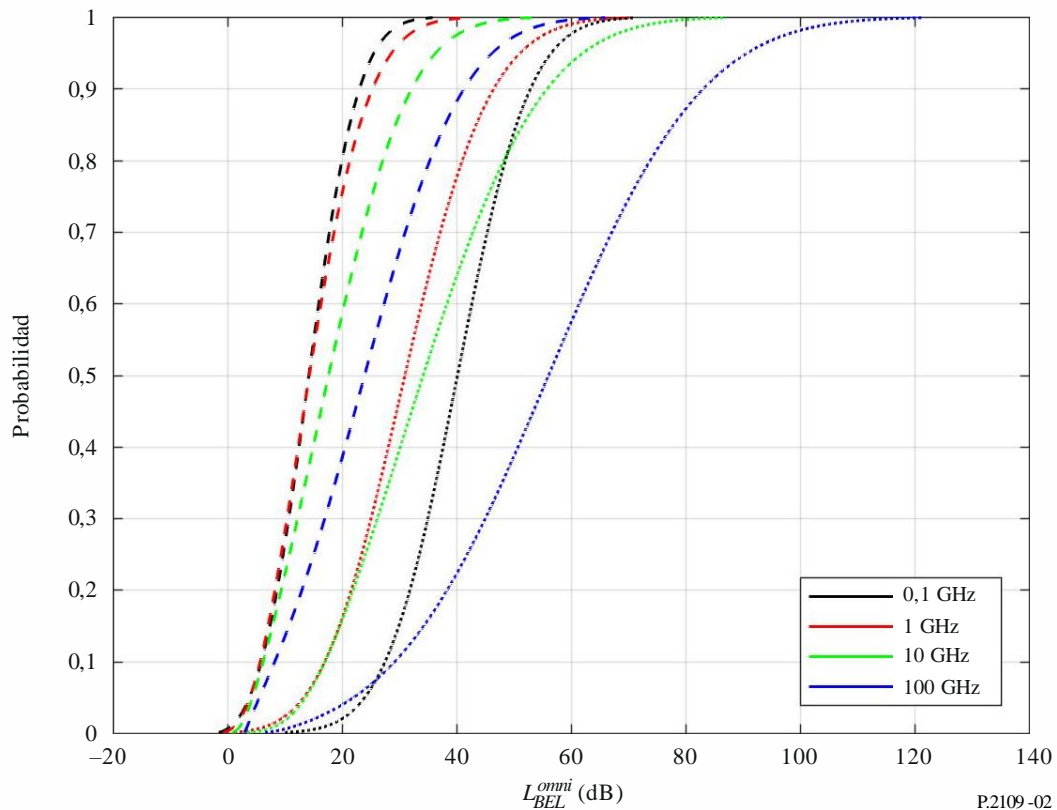


FIGURA 2

Pérdida por penetración en edificios predicha con incidencia horizontal
(línea discontinua: tradicional, línea de punto: con eficiencia térmica)



P.2109-02

Anexo 2

1 Introducción

En el presente Anexo se definen los términos relativos a las pérdidas en edificios y se dan orientaciones sobre las prácticas de medición recomendadas.

En el Informe UIT-R P.2346 se recopilan los resultados de la medición de las pérdidas debidas a la penetración en edificios.

2 Descripción de casos que implica la interfaz exterior-interior

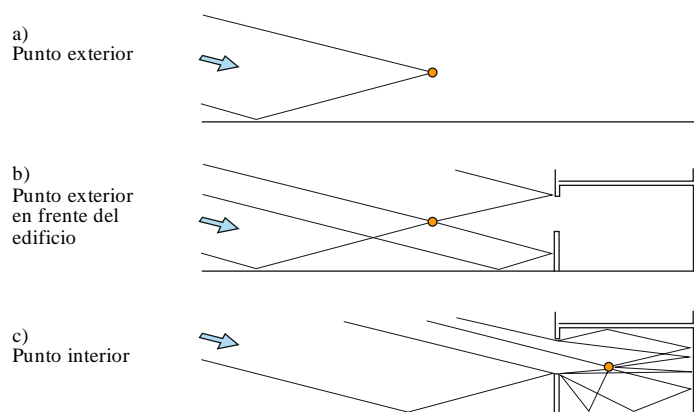
2.1 Propagación de exteriores a interiores: temas relativos al campo de referencia de pérdidas debidas a la penetración

Una dificultad que presenta la definición del campo de referencia de pérdidas debidas a la penetración es que la presencia del edificio modificará las intensidades de la señal fuera de él. La Fig. 3 ilustra de forma simplificada los casos que pueden aparecer. Las tres partes de la figura muestran lo siguiente:

- Un punto exterior relativamente aislado recibe un rayo directo y un rayo reflejado en el suelo. De hecho, en un entorno urbano, ambos rayos pueden llegar desde una fuente distante por difracción en un edificio situado a la izquierda de la Figura. Para la propagación con pequeños ángulos respecto a la horizontal, habrá una estructura lobular sencilla y fundamentalmente vertical, es decir con máximos y mínimos cuando el punto se desplaza verticalmente.

- b) Sin desplazar el punto, se sitúa un edificio tras él. Ahora recibe dos rayos adicionales reflejados por el edificio, uno de los cuales también se refleja en el suelo. El diagrama lobulado tendrá en este caso una estructura fina tanto en dirección vertical como en dirección horizontal.
- c) El punto se desplaza en este caso al interior del edificio. A efectos ilustrativos se supone una frecuencia lo suficientemente alta como para que sólo sean significativos los rayos que atraviesan una ventana. A frecuencias inferiores, en las que la penetración a través de los muros es significativa, el diagrama de rayos sería distinto.

FIGURA 3
Diagrama de rayos simplificado para puntos exteriores e interiores



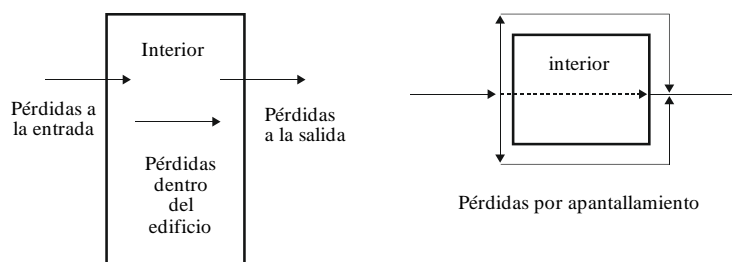
P.2109-03

Aunque la propagación multitrayecto causa lóbulos, la suma de potencia de múltiples rayos se aproxima al valor del campo promediado espacialmente. En consecuencia, por regla general, cabe esperar que la presencia de un edificio detrás un receptor incremente la intensidad de la señal recibida. En el interior del edificio, especialmente cerca del muro exterior iluminado, es probable que se reciba un gran número de rayos aunque muchos de ellos se verán atenuados por la transmisión, la reflexión o la difracción. Por consiguiente, es posible que la señal interior sea más intensa que la exterior.

2.2 Pérdidas de propagación en el edificio

La Fig. 4 muestra los distintos tipos de pérdidas en edificios que se producen en los casos exterior-interior e interior-exterior. En los siguientes puntos aparecen las definiciones.

FIGURA 4
Diferentes tipos de pérdidas de propagación en el edificio



P.2109-04

3 Definiciones

3.1 Definición de pérdidas debidas a la penetración en el edificio

Las pérdidas debidas a la penetración en edificios constituyen las pérdidas adicionales cuando el terminal se encuentra dentro de un edificio.

3.2 Definición de pérdidas por apantallamiento de un edificio

Las pérdidas por apantallamiento de un edificio es la diferencia entre el valor mediano de la variabilidad de emplazamiento del nivel de la señal fuera de la cara iluminada de un edificio y el nivel de la señal fuera de la cara opuesta del edificio a la misma altura sobre el nivel del suelo, promediando espacialmente el desvanecimiento multitrayecto para ambas señales. Pueden considerarse como las pérdidas de transmisión a través de un edificio.

3.3 Definición de penetración (por ejemplo, de un muro)

Las señales fuera del edificio entran a un edificio cerrado por penetración principalmente a través de los muros. La penetración por los muros también se conoce como penetración a través de las divisiones en el interior del edificio. Dentro de los edificios las pérdidas por penetración en el muro es la diferencia entre el valor mediano de la variabilidad de emplazamiento del nivel de la señal en un lado del muro y el nivel de la señal en el lado opuesto del muro a la misma altura sobre el nivel del suelo, promediando espacialmente el desvanecimiento multitrayecto para ambas señales. Pueden considerarse como las pérdidas de transmisión a través de un muro.

3.4 Definición de penetración por abertura

La penetración por abertura es la penetración de las señales desde un lado de un muro al otro lado a través de aberturas en el muro, como por ejemplo ventanas.

3.5 Definición de pérdidas debidas a la salida del edificio

Por reciprocidad, el valor numérico de las pérdidas debidas a la salida del edificio será el mismo que el de las pérdidas debidas a la penetración en el edificio. En el resto del texto se utilizan los dos términos indistintamente.

4 Medición de las pérdidas debidas a la penetración en el edificio

4.1 Introducción

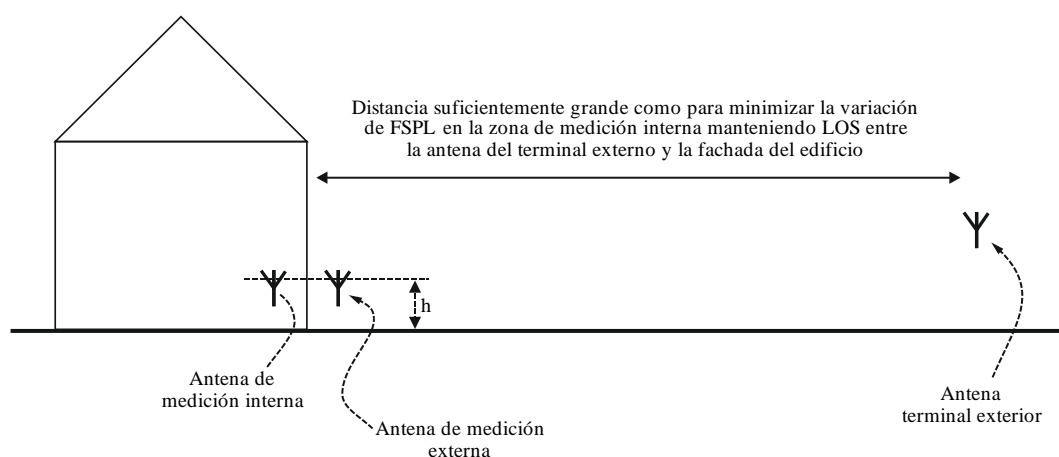
Las pérdidas debidas a la penetración en el edificio pueden medirse como la diferencia, expresada en dB, entre el valor mediano espacial del nivel de la señal al otro lado de la cara iluminada de un edificio y el valor mediano espacial del nivel de la señal dentro del edificio a la misma altura sobre el suelo, indicada como «h» en la Fig. 5 *infra* (es decir, pérdidas = valor mediano espacial del campo externo – valor mediano espacial del campo interno, expresados en decibelios). El objetivo de medir el valor en el exterior es obtener una aproximación a la intensidad de campo que existiría en la posición interior si no existiera el edificio. Cuando la distancia entre las mediciones en el exterior y en el interior constituya una parte considerable del trayecto total, se debe tomar en consideración las pérdidas adicionales en el espacio libre.

El campo en el exterior debe medirse lo más cerca posible al edificio, pero de modo que se eviten efectos del campo cercano y no se alteren las características de la antena. Cabe esperar que la medición con antenas direccionales u omnidireccionales produzcan resultados diferentes; en cualquier caso, las características de la antena deben describirse meticulosamente. Cuando no resulte

posible medir el campo en el exterior incidente en el edificio, debe utilizarse un valor previsto, en cuyo caso se debe indicar claramente.

Normalmente, las mediciones se realizan con visibilidad directa (LoS) entre el terminal situado en el exterior y la fachada del edificio del caso.

FIGURA 5
Situación de las antenas de referencia y de medición para medir las pérdidas debidas a la penetración en el edificio



P.2109-05

La superficie elegida para el promedio espacial dentro del edificio dependerá de la aplicación particular y debe estipularse claramente; se ha observado que los promedios de salas representan información práctica y útil para la discretización.

4.2 Parámetros que se han de registrar

Los siguientes parámetros se deben registrar cuando se midan las pérdidas debidas a la penetración en los edificios.

Cabe esperar que cada conjunto de mediciones conste de una serie de muestras, cuyos resultados se expresarán como una función de distribución acumulativa de pérdidas, en forma de cuadro.

Se ruega a los investigadores que proporcionen el mayor número de detalles adicionales posibles; concretamente, debería proporcionarse en la medida de lo posible fotografías del interior y del exterior.

CUADRO 2
Parámetros de medición

Parámetro	Unidades o clasificación	Notas
Frecuencia	MHz	
Ancho de banda de la señal de prueba	MHz	0 MHz si se utiliza una fuente CW
Entorno circundante	Abierto/suburbano/urbano/urbano denso	Necesario para estimar la importancia del acoplamiento de la energía dispersa desde otros edificios

CUADRO 2 (*fin*)

Parámetro	Unidades o clasificación	Notas
¿Visibilidad directa del edificio?	Sí/No	Debería haber LoS para minimizar el error de medición
Promedio	Espectral/espacial/otro	Campo de formato libre, para que el usuario pueda describir el tipo de promedio utilizado (en su caso)
Profundidad de penetración	1 = terminal interior en una sala/espacio con muros externos frente al terminal exterior 2 = terminal interior en una sala/espacio sin muros externos 3 = terminal interior en una sala/espacio con otros muros externos	
Suelo sobre el que se toman las medidas		Planta baja = 0
Superficie en la que se toman las medidas	Metros cuadrados	
Número de muestras		Suficiente para que los resultados tengan significado estadístico
Referencia	1 = valor mediano de la señal medida 2 = pérdidas previstas en el trayecto en el espacio libre	Medición preferida en la medida de lo posible
Distancia del edificio al terminal exterior	metros	
Ángulo de elevación del trayecto	grados	
Mínimo acimut con respecto a la normal a la fachada del edificio	grados	
Máximo acimut con respecto a la normal a la fachada del edificio	grados	

CUADRO 3

Parámetros del edificio

Parámetro	Unidades o clasificación	Notas
Ancho	metros	Forma aproximada en caso de edificio irregular
Largo	metros	
Alto	metros	
Número total de alturas		
Espesor de los muros exteriores	metros	

CUADRO 3 (cont.)

Parámetro	Unidades o clasificación	Notas
Espesor de los muros interiores	metros	
Espesor de los suelos	metros	
Proporción de la superficie de elevación del edificio compuesta por ventanas/aperturas	%	
Ventanas	0 = no se sabe 1 = sencilla 2 = doble 3 = triple 9 = otras	
Revestimiento de las ventanas	0 = no se sabe 1 = ninguno 2 = vidrio metalizado 3 = malla de alambre interna 4 = persianas/contraventanas metálicas 9 = otros	
¿Provista de aislamiento térmico metálico?	0 = no se sabe 1 = no 2 = sí 9 = otro	
Material del suelo	0 = no se sabe 1 = madera 2 = metal 3 = hormigón 9 = otro	
Material primario del muro exterior	0 = no se sabe 1 = piedra 2 = ladrillo 3 = ladrillo hueco 4 = bloque ligero 5 = madera 6 = hormigón 7 = vidrio 8 = metal 9 = otro	Material del que está compuesta la mayor parte de los muros exteriores
Material secundario del muro exterior	0 = no se sabe 1 = piedra 2 = ladrillo 3 = ladrillo hueco 4 = bloque ligero 5 = madera 6 = hormigón 7 = vidrio 8 = metal 9 = otro	

CUADRO 3 (*fin*)

Parámetro	Unidades o clasificación	Notas
Paredes internas	0 = sin paredes internas 1 = piedra 2 = ladrillo 3 = bloque ligero 4 = madera 5 = hormigón 6 = Yeso (travesaños de madera) 7 = Yeso (travesaños metálicos) 8 = Yeso metalizado 9 = otro	
Material del tejado	0 = no se sabe 1 = baldosas de hormigón 2 = tejas de arcilla 3 = tejas de madera 4 = láminas metálicas 5 = madera con fieltro para tejado 9 = otros	
