

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA



Proyecto Fin de Carrera

Estudio del canal a 60 GHz en entornos interiores mediante una herramienta de trazado de rayos



AUTOR: Francisco Javier Sevilla Cortado
DIRECTOR(ES): Juan Pascual García

Noviembre 2011



Autor	Francisco Jsvier Sevilla Cortado
E-mail del Autor	franse87@gmail.com
Director(es)	Juan Pascual García
E-mail del Director	juan.pascual@upct.es
Título del PFC	Estudio del canal a 60 GHz en entornos interiores mediante una herramienta de trazado de rayos
<p>Resúmen</p> <p>El presente proyecto tiene como objetivo la aplicación del método semi-determinista conocido como trazado de rayos en el estudio del canal radioeléctrico en la banda de 57 GHz a 66 GHz. Este método está basado en la obtención de una serie de imágenes que permiten eliminar las paredes del entorno de interior. Desde cada imagen se traza un rayo que constituye una réplica de la señal transmitida. El estudio de todas las réplicas posibilita no solo el cálculo de las coberturas sino también un estudio profundo del canal tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia.</p> <p>Este método no ha sido empleado en este tipo de entornos interiores en la banda de interés. Sin embargo, es un método muy preciso. Así, en este proyecto se espera caracterizar el canal radio en la banda bajo estudio de una forma más completa y precisa que en los trabajos presentados en la literatura científica de este campo.</p>	
Titulación	Ingeniería de Telecomunicación
Departamento	Departamento de Tecnologías de la Información y Comunicaciones
Fecha de Presentación	Noviembre - 2011

Índice

1. Introducción

- 1.1. Introducción.....5
- 1.2. Objetivos del Proyecto.....11

2. Análisis del Trazador 3D y propiedades eléctricas de los materiales a 60 GHz

- 2.1. Modelos de propagación.....12
 - 2.1.1. Método de las imágenes.....15
 - 2.1.2. Lanzado de rayos.....19
- 2.2. Análisis de los simuladores empleados.....21
 - 2.2.1. Trazador 3D basado en la Teoría de Imágenes.....21
 - 2.2.2. Lanzador de rayos..... 34
- 2.3. Características eléctricas de los materiales a 60 GHz.....39

3. Análisis del rendimiento y eficacia del Trazador 3D. Comparación con el lanzador de rayos

- 3.1. Análisis del rendimiento y eficacia del Trazador 3D. Comparación con el lanzador de rayos.....44
 - 3.1.1. Estructura de 4 habitaciones.....45
 - 3.1.2. Estructura con corredor.....53
 - 3.1.3. Estructura de una casa típica de una planta.....57
- 3.2. Comparación de resultados entre Trazador y Lanzador.....61
 - 3.2.1. Estructura de 4 habitaciones.....62
 - 3.2.2. Estructura de una casa típica de una planta.....73

3.3	Simulaciones para distintas permitividades del material.....	76
3.3.1.	Análisis de los resultados obtenidos para elementos con diferentes permitividades.....	76
3.3.2.	Estudio de la influencia de la variación de la permitividad en las simulaciones realizadas en el laboratorio de medidas del edificio I+D+I.....	89
4.	Estudio del canal a 60 GHz mediante el trazador 3D: comparación con medidas reales.	
4.1.	Introducción.....	96
4.2.	Mediciones en el laboratorio SICOMO.....	98
4.2.1.	Descripción del entorno.....	98
4.2.2.	Simulaciones y mediciones realizadas.....	99
4.2.	Mediciones en el laboratorio SAIT del edificio I+D+I.....	100
4.3.1.	Descripción del entorno.....	100
4.3.2.	Respuesta en frecuencia. Estudio de la potencia.....	102
4.3.3.	Cálculo del Power Delay Profile (PDP) a partir de la respuesta en frecuencia.....	107
4.3.4.	Cálculo del PDP en una frecuencia (60 GHz).....	116
4.3.5.	Estudio de las contribuciones mediante imágenes.....	121
4.3.6.	Análisis de la influencia de la permitividad.....	141
5.	Conclusiones.....	142
6.	Referencias.....	145

Capítulo 1

Introducción.

1.1 - Introducción

Actualmente, las personas siempre están conectadas a redes de datos y mueven una parte de su vida a la red. La demanda de Internet de banda ancha móvil es el segmento de mayor crecimiento en el mercado de las comunicaciones, ya que los usuarios llevan tiempo exigiendo mayor velocidad de acceso que les permita el desarrollo de nuevos e innovadores servicios y aplicaciones. Así se necesita satisfacer una mayor demanda de servicios de banda ancha entre dispositivos que generan o contienen mucha información.

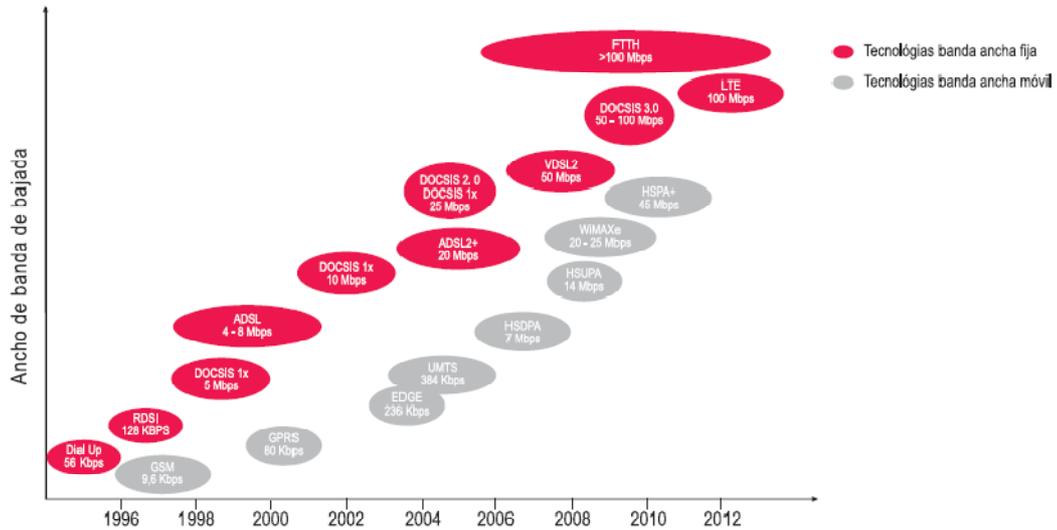


Figura 1.1. Evolución de las velocidades de acceso [14]

Este aumento en el volumen de tráfico de voz y datos implica un mayor requerimiento de ancho de banda. Predecir la demanda futura de ancho de banda no es sencillo, sin embargo puede esperarse que en los próximos años la demanda no pueda ser satisfecha con las tecnologías y arquitecturas de red actualmente disponibles. Por ello, las infraestructuras de telecomunicaciones deben actualizarse para conseguir dar soporte a estas nuevas tecnologías en auge.

La mayor parte del tráfico de datos se produce en entornos domésticos o de oficinas, dónde, además, la cobertura es más reducida.



Figura 1.2. Requerimientos de banda ancha en una vivienda [14]

La instalación de la infraestructura necesaria para dar soporte a este tipo de servicios en una vivienda como la de la Figura 2, o cualquier otro tipo de estructura como puede ser unas oficinas, laboratorios, etc., se puede realizar de dos formas: mediante sistemas cableados o a través de tecnología inalámbrica.

Un sistema cableado presenta ciertas ventajas y desventajas en la tarea de provisión de servicios de banda ancha. Su ventaja más destacable reside en las altas velocidades de transmisión que puede soportar. Otra ventaja consiste en que el sistema es independiente de la información que se transmite a través de él, lo cual permite que la arquitectura sea abierta. Además, es un sistema confiable ya que utiliza una topología de estrella. La estructura de esta topología limita los daños o desconexiones únicamente a la parte o sección dañada, de modo que el resto de la red no se ve afectada. En cuanto a los inconvenientes, hay que destacar que el despliegue es difícil, especialmente en zonas interiores como edificios, oficinas, etc. Esta desventaja convierte a los sistemas cableados, a pesar de su fiabilidad y gran rendimiento, en una tecnología poco práctica para prestar servicios de banda ancha en entornos interiores.

Los soportes inalámbricos proveen las soluciones necesarias para paliar las desventajas más importantes de los sistemas cableados, haciendo posible que tanto los periféricos como los equipos (teclado, ratón, micrófono, altavoz, teléfono, ordenador) se conecten a distancia a través de varios medios: radiofrecuencia, en la mayoría de los casos, o sistemas ópticos e infrarrojos. La libertad de movimientos, tanto en viviendas como especialmente en empresas, está asegurada. La gran aportación de estos sistemas es la capacidad de obtener las prestaciones necesarias de forma instantánea, cómoda y sencilla y con las máximas garantías de seguridad.

La ventaja de los sistemas inalámbricos con respecto de los sistemas cableados es evidente: la libertad de movimiento. A esta favorable situación se le suman otras oportunidades tales como:

- Disminución de costes de implantación y explotación, al reducir gastos de mantenimiento y permitir la reducción de mano de obra.
- Desarrollo de soluciones a medida, al permitir la comunicación con dispositivos de difícil acceso o ubicados en emplazamientos múltiples y remotos.
- Acceso a la interrelación en tiempo real, al posibilitar una mayor flexibilidad en los procesos de registro, control e interrelación con sistemas propios o externos.

- Mejora en los procesos de negocio, ya que mediante la mejora y optimización de los procesos, ofrecen la posibilidad de acceder a nuevos mercados ofreciendo productos y servicios novedosos a menor coste.
- Aumento de la ventaja competitiva, la disponibilidad de estas tecnologías frente a rivales que operan con sistemas tradicionales permiten un mejor posicionamiento empresarial.

Sin embargo, uno de los mayores problemas que presentan los sistemas inalámbricos reside en que el espectro es un recurso limitado. Para ello se hace uso de la división celular.

La división celular consiste en la división del área total en células cubiertas por estaciones bases dedicadas. En células separadas entre sí a una determinada distancia, llamada distancia cocanal o distancia de reutilización, pueden reutilizarse las mismas frecuencias. Para aumentar la capacidad y velocidad del sistema celular se recurre a la disminución del tamaño de las células.

Un adelanto muy importante para mejorar la cobertura y la prestación de servicios de datos de alta velocidad a un coste económico aceptable es el uso de las denominadas femtocélulas, células servidas por estaciones base de corto alcance (dan cobertura a 30-50 metros) y de bajo coste que se instalan en entornos indoor.

Este tipo de células son ideales para el entorno que vamos a estudiar, puesto que el tamaño de cada célula será tan pequeño como una habitación. Sin embargo, celdas tan pequeñas producen un alto nivel de interferencias entre sí. Una solución para este problema es el empleo de frecuencias más elevadas. Aunque no todas las bandas de frecuencia cumplen esta condición y además son capaces de proporcionar el ancho de banda suficiente para aplicaciones de alta velocidad.

En la actualidad se emplean frecuencias de entre 1 y 2 Ghz en entornos indoor. Como hemos mencionado anteriormente se requieren velocidades de transmisión más elevadas, por lo que una nueva banda de frecuencias está empezando a ser utilizada en este tipo de microcélulas. La banda de 60 GHz presenta una serie de características apropiadas para cumplir los objetivos anteriores.

La atenuación por la resonancia del oxígeno es una ventaja para entornos interiores. La principal característica de las comunicaciones a 60 GHz, es que a dicha frecuencia de trabajo la atmósfera atenúa mucho la energía electromagnética (a 60 GHz tiene lugar la resonancia del oxígeno). De esta forma se logra que las ondas electromagnéticas que consiguen escapar de la estructura de un edificio se atenúen rápidamente, por lo que no se producirán interferencias sobre otros servicios ubicados en la mencionada banda de trabajo.[Car98][15]

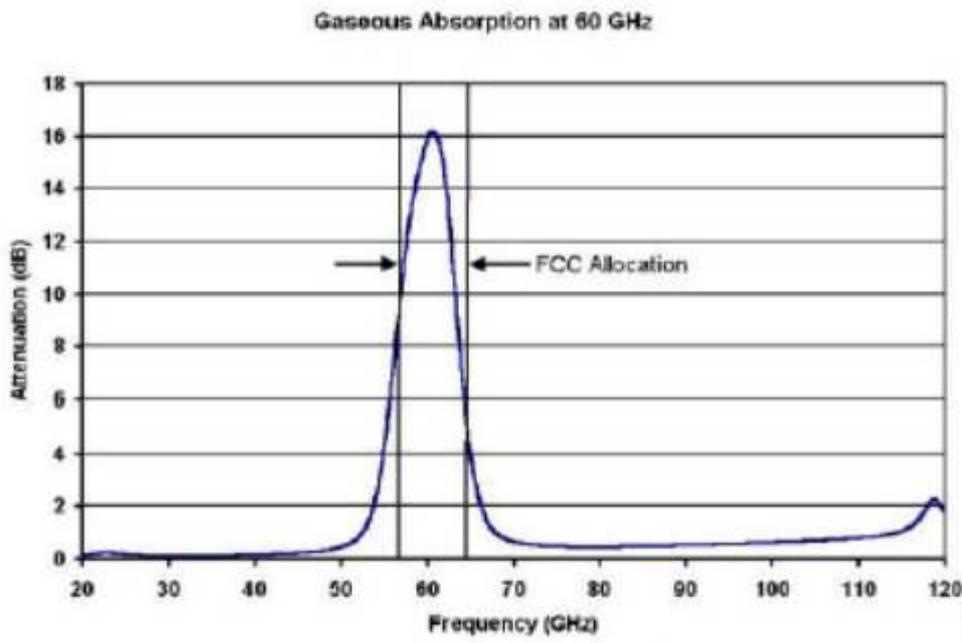


Figura 1.3. Atenuación producida por el oxígeno [1]

La segunda de las ventajas es que la velocidad de transmisión es mucho más elevada que para frecuencias inferiores (hasta 10 veces más rápida, ya que se puede emplear un ancho de banda muy grande), lo cual es de sumo interés para los sistemas móviles actuales que requieren un gran bando de ancha.

Otro de los motivos por la que se ha escogido esta frecuencia es por la gran atenuación que introducen las paredes, aparte de la causada por el oxígeno, y por la disponibilidad del espectro. El rango entre 57 y 66 GHz está exento de licencias, lo que significa que las operadoras pueden reducir sus costes de explotación al evitar las costosas licencias de espectro de otras bandas y los largos procedimientos de solicitud y autorización. Existe un amplio rango disponible para estas frecuencias, lo que facilita el uso de esquemas de modulación de bajo orden que podrán utilizarse para la transmisión de grandes cantidades de datos.

Otra de las ventajas de estos sistemas, es que las antenas que trabajan a 60 GHz son muy directivas y de un tamaño mucho menor tal como podemos observar en la Figura 1.2.

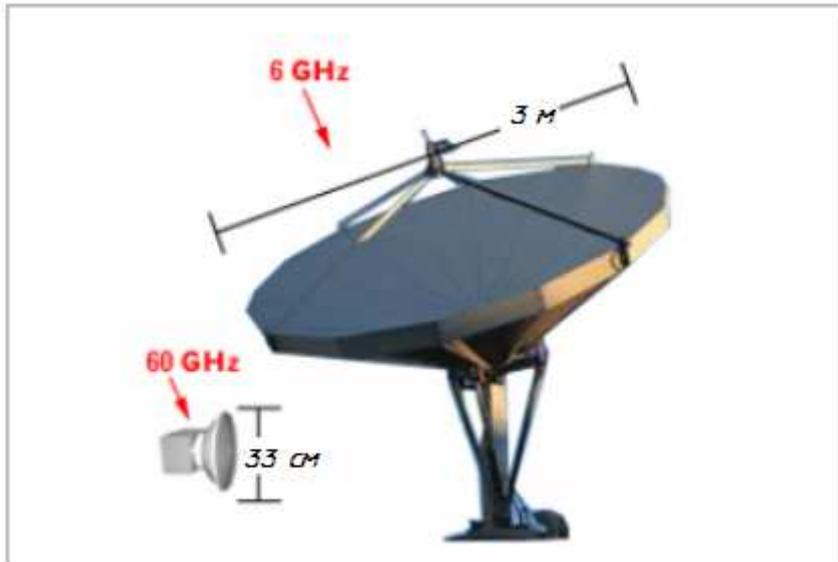


Figura 1.4. Comparativa entre antenas [1]

Con todo ello se puede decir que empleando este tipo de sistemas de comunicaciones móviles a 60 GHz el transmisor y receptor deberían tener prácticamente visión directa y el radio de cobertura será de aproximadamente 10 metros. Esto que puede parecer un inconveniente, en realidad se convierte en una de sus principales ventajas. Ya que la convierte en la frecuencia ideal para la transmisión segura en distancias cortas. Debido a esta característica, se puede reutilizar la misma frecuencia una y otra vez sin ninguna interferencia para el desarrollo de aplicaciones de alta velocidad de transmisión de datos en entornos interiores.

1.2 - Objetivos del Proyecto.

El presente proyecto tiene como objetivo la aplicación del método semi-determinista conocido como trazado de rayos en el estudio del canal radioeléctrico en la banda de 57 GHz a 66 GHz. Este método está basado en la obtención de una serie de imágenes que permiten eliminar las paredes del entorno de interior. Desde cada imagen se traza un rayo que constituye una réplica de la señal transmitida. El estudio de todas las réplicas posibilita no solo el cálculo de las coberturas sino también un estudio profundo del canal tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia.

Este método no ha sido empleado en este tipo de entornos interiores en la banda de interés. Sin embargo, es un método muy preciso. Así, en este proyecto se espera caracterizar el canal radio en la banda bajo estudio de una forma más completa y precisa que en los trabajos presentados en la literatura científica de este campo.

No existen trabajos de caracterización del canal móvil en este tipo de entornos interiores a esta frecuencia con herramientas precisas. Por este motivo y debido al creciente interés y desarrollo de tecnologías de alta velocidad, se hace de especial interés el perfeccionamiento de este tipo de métodos.

Estas herramientas nos permitirán la obtención de la potencia recibida por un receptor en diferentes puntos de una habitación, oficina, almacén, etc. Estos resultados se podrán comparar con estudios teóricos para observar el grado de similitud entre ambos. Si la precisión alcanzada por el método es superior a los trabajos desarrollados hasta la actualidad se podrá hacer uso de una herramienta, que permitirá la caracterización del canal móvil en zonas interiores eficientemente.

El proyecto consta de las siguientes fases:

Fase 1: Estudio de la caracterización electromagnética de los materiales de un entorno de interiores en la banda de 57 GHz a 66 GHz.

Fase 2: Simulación con la herramienta de trazado de rayos de entornos de interiores presentes en la literatura científica. Comparación con los métodos de análisis y de cálculo de coberturas mostrados en los trabajos de la literatura científica.

Fase 3 Recolección de medidas en un entorno interior real en la banda bajo estudio.

Fase 4: Comparación de las simulaciones realizadas con el trazador de rayos y con otras herramientas de cálculo de cobertura con las mediciones.

Capítulo 2

Análisis del Trazador 3D y propiedades eléctricas de los materiales a 60 Ghz.

2.1 Modelos de propagación

El entorno correspondiente al interior de un edificio es diferente al entorno urbano ya sea macrocelular o microcelular. En los entornos interiores el tipo de elementos que componen el canal es mucho más importante que la distancia ya que ésta es reducida. Las potencias utilizadas son pequeñas ya que se desea que la célula quede circunscrita al edificio o a parte de él. Todo ello provoca que los retardos entre réplicas sean pequeños y que cada réplica posea una potencia reducida. Consecuentemente el ensanchamiento temporal será a su vez reducido. Es importante destacar que, en entornos indoor, la velocidad del usuario suele ser baja. Por lo que el efecto Doppler es despreciable. El canal varía lentamente, aunque cuando lo hace la variación es grande. La caracterización de dicho canal tiene como objetivo determinar la respuesta al impulso del canal y a partir de ésta otros parámetros importantes que definen el comportamiento del canal, como puede ser el ancho de banda de coherencia y parámetros como el retardo medio y la dispersión media del retardo.

Los muebles y las diversas estructuras que componen las habitaciones provocan que los procesos de difusión y difracción sean más importantes que en entornos abiertos. Esto implica una mayor dificultad en la caracterización del canal móvil en un entorno indoor.

Con todo ello las pérdidas son difíciles de calcular en un entorno interior. Debido a la variedad de barreras físicas y materiales dentro de la estructura indoor, las señales no pierden energía de forma predecible. La trayectoria entre el receptor y el transmisor suele estar bloqueada por paredes, suelos u otros obstáculos. Dependiendo de la construcción del edificio y su diseño, la señal normalmente se propaga a lo largo de pasillo y en zonas abiertas. En algunos casos, la señal transmitida puede tener una trayectoria directa hasta el receptor (Line of Sight LOS) por ejemplo: almacenes, suelos de fábrica, salas de conferencia y estadios. En la mayoría de los casos este rayo directo suele estar obstruido.

Existen diferentes modelos de propagación para describir las características en un entorno indoor, basados en los diferentes mecanismos de propagación: propagación en espacio libre, reflexión, difracción y difusión. Un modelo de propagación se define como un conjunto de expresiones matemáticas, diagramas y algoritmos usados para representar las características radio un canal dado. Se pueden clasificar en empíricos, semi-empíricos, deterministas y semi-deterministas [10][7].

Los modelos empíricos realizan campañas masivas de medidas, y a partir de los datos obtenidos en éstas, describen el canal móvil a través de ecuaciones (normalmente curvas de regresión) y tablas. Son simples, rápidos, fáciles de utilizar y no requieren una descripción minuciosa del entorno. Sin embargo, su rango de aplicación se reduce a entornos similares a aquellos en los que se tomaron las medidas [5][7].

Los modelos semideterministas están a caballo entre los deterministas y los empíricos. Necesitan información del entorno pero no tan detallada como los deterministas. Son relativamente fáciles y rápidos de aplicar [3] [4].

Los modelos deterministas predicen la respuesta del canal radio a partir de las ecuaciones de Maxwell o aproximaciones de éstas. Para estos modelos, es requisito fundamental el conocimiento del entorno específico de propagación bajo estudio, y suelen ser bastante lentos. Uno de estos modelos es el trazado de rayos, y utiliza aproximaciones de las ecuaciones de Maxwell basadas en Óptica Geométrica (*GO*) y la Teoría Uniforme de la Difracción (*UTD*) [2]. Estos modelos simplifican el problema de la propagación sustituyendo los frentes de onda por tubos de rayos; una vez hecha esta simplificación, aplican modelos de difracción, reflexión y transmisión a estos rayos para explicar los fenómenos físicos que se producen en cada uno de estos mecanismos de propagación [2].

Para que esta aproximación sea válida, los obstáculos deberán tener dimensiones mayores a la longitud de onda de la señal bajo estudio. Su principal inconveniente es el alto tiempo de cómputo empleado que es proporcional al número de puntos en los que se evalúa el campo en dicha área. Existen dos modelos deterministas: el lanzador de rayos y el trazador. En este proyecto haremos uso de dos algoritmos, principalmente emplearemos un simulador basado en la teoría de imágenes, y un segundo, para comparar resultados, de lanzado de rayos.

El trazado de rayos se basa en la Óptica Geométrica fundamentándose en la suposición de que para frecuencias muy altas, la longitud de onda es menor que las dimensiones de los objetos, por lo cual podemos asumir las ondas electromagnéticas como rayos que se propagan en línea recta. Dichos rayos se reflejarán, difractarán y transmitirán. Sin embargo si consideramos únicamente la Óptica Geométrica habrá situaciones que no podremos considerar, por ello haremos una extensión a la Teoría Geométrica de la Difracción (GTD) y más concretamente a la Teoría de la Difracción (UTD). Estos modelos contemplan la opción de que los rayos pueden difractarse, posibilidad que no tenía en cuenta la Óptica Geométrica. En la herramienta de trazado de rayos se han implementado los coeficientes de difracción descritos por la UTD ya que mejoran el comportamiento de la GTD en ciertas zonas.

Los modelos de Trazado de Rayos se utilizan extensamente tanto en 2D como en 3D: en el modelo de 2D solamente se trazan los rayos en un plano, así que necesita menos tiempo del cómputo, sin embargo, en el modelo de 3D se deben trazar todos los rayos, así que necesita mucho más tiempo del cómputo. La técnica del Trazado de Rayos en 2D es ampliamente utilizada para la predicción de interior de la propagación. Cuando el entorno de interior es grande y complejo, tomará mucho tiempo CPU para calcular las características de la propagación. Es por lo tanto importante mejorar la eficacia de cómputo. Existen técnicas de aceleración que se usan para disminuir este tiempo de CPU.

Existen dos formas de trazar rayos:

- La primera se llama en inglés Ray-Launching que consiste en el lanzado de rayos desde la posición del transmisor con una separación angular constante y en su posterior seguimiento. También existe “Back-ray tracing” o lanzado de rayos “hacia atrás”, desde el receptor hacia el transmisor.

- La segunda de ellas es mediante el método de la imagen, que se basa en la generación de imágenes a partir de las posibles reflexiones que puedan producirse en un entorno. La cuál se explicará en el punto 2.1.1.

2.1.1 Método de las imágenes

La presencia de un obstáculo, especialmente si este está en las inmediaciones del elemento radiante, puede alterar significativamente las propiedades radiantes finales del sistema en sí. En la práctica el obstáculo que comúnmente nos encontramos siempre es el suelo. Parte de la energía dirigida hacia éste se transmite mediante la reflexión, siendo la cantidad de energía reflejada dependiente de la geometría y parámetros del suelo.

Normalmente el suelo es un medio con pérdidas (σ distinto de cero) cuya conductividad efectiva crece con la frecuencia. Por lo tanto es normal esperar que actúe como un buen conductor por encima de una cierta frecuencia, en función a su contenido en humedad. Para simplificar el análisis se puede asumir que el suelo es un conductor eléctrico perfecto, orientado horizontalmente e infinito en extensión. Este procedimiento es extensible al análisis de características de algún elemento radiante próximo a algún otro conductor de la misma naturaleza, es decir, conductividad perfecta, horizontal e infinita. Debe constar que es imposible trabajar con dimensiones infinitas pero sí que es posible hacerlo con elementos muy grandes, simplificando al caso infinito.

Para analizar el comportamiento de un elemento radiante próximo a un plano conductor infinito se introducirán fuentes virtuales, llamadas imágenes, que tendrán efecto para la reflexión. Como indica su nombre, esta fuente no es real sino que es imaginaria y su combinación con las reales dan lugar a un nuevo sistema equivalente que reemplazaría al original, sólo con propósitos de análisis, ya que como se ha dicho anteriormente este nuevo sistema no es real, pero si equivalente al anterior. Así se hará uso de una nueva geometría o sistema que sólo sirva para obtener un resultado equivalente al del problema original [8][10].

Se asume que un dipolo vertical (elemento radiante) está situado a una distancia 'h' sobre un conductor perfecto, plano e infinito, como se muestra a continuación:

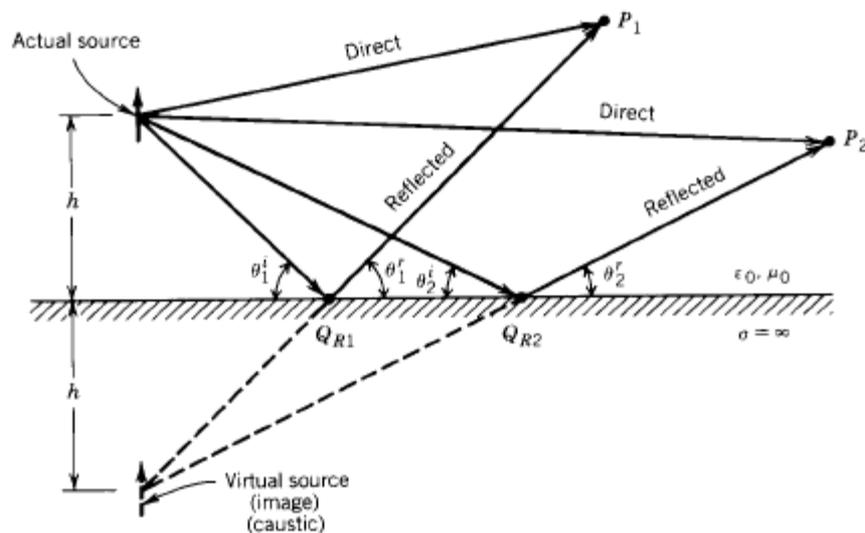


Figura 2.1. Dipolo vertical y su imagen para determinar la reflexión sobre un conductor plano de extensión infinita [2].

Asumiendo que no hay acoplamiento mutuo y que la energía es radiada en todas direcciones, para el observador P_1 habrá un rayo directo y además uno reflejado procedente del punto QR_1 en la interfaz creada por el conductor y que obedece a la ley de la reflexión que establece que $\theta_1 = \theta_1^i$. Se deduce por lo tanto que la energía en medios homogéneos describe trayectorias rectas describiendo los caminos más cortos. La onda que llega entonces al punto de observación P_1 mediante la reflexión parece originada por la imagen de la fuente a una distancia 'h' por debajo del conductor. Si se atiende al receptor situado en P_2 el punto de reflexión es QR_2 pero la imagen sigue siendo la misma que antes. Esta conclusión se extiende a cualquier otro punto por encima de la interfaz del conductor.

La cantidad de energía reflejada depende generalmente de los parámetros del medio sobre el que incide la onda. En el caso de ser un conductor perfecto se produce la reflexión completa de la onda siendo cero el campo al otro lado de la interfaz. De acuerdo a las condiciones de contorno la componente tangencial del campo eléctrico debe de ser cero en todos los puntos de la interfaz o superficie del conductor. Esto lo aprovechamos para determinar la polarización del campo reflejado comparado con la del rayo directo [8].

Aparte de las fuentes eléctricas también se puede trabajar con fuentes equivalentes magnéticas y conductores magnéticos, teniendo en cuenta ahora que la condición de contorno a aplicar será que la componente normal del campo magnético desaparece en todos los puntos de la superficie del conductor. En la siguiente figura se muestran los casos de fuentes y sus imágenes:

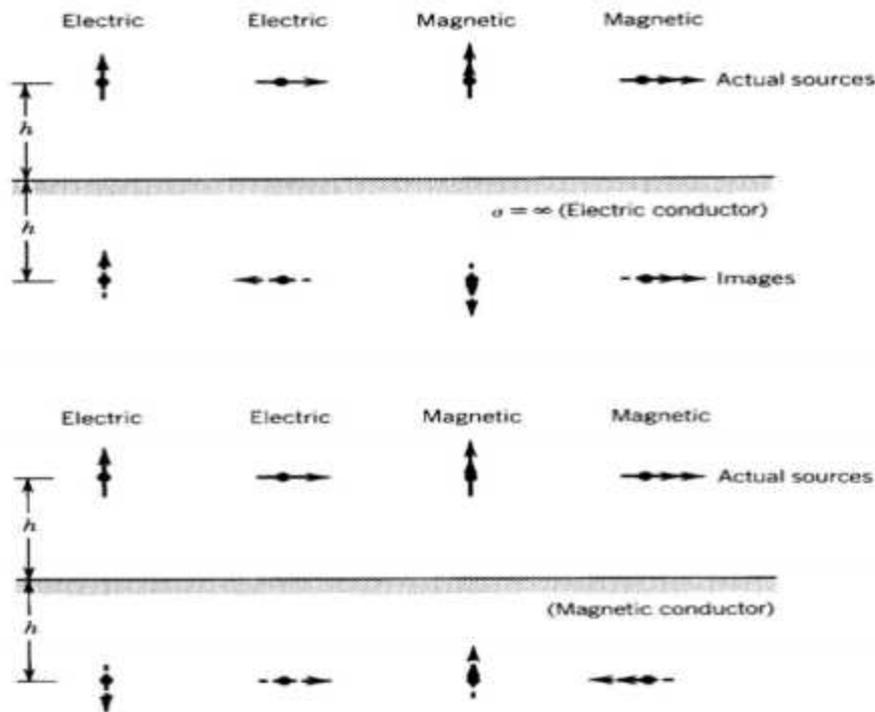


Figura 2.2. Fuentes eléctricas y magnéticas y sus respectivas imágenes [10]

Como conclusión más básica se puede decir que esta teoría genera imágenes de todas las fuentes en todos los planos o respecto de todos los planos que pudiera tener el sistema. De esta forma se obtendrían N imágenes de primer orden si hubiera N planos a considerar con una sola fuente a estudio. Hasta ahora se ha hecho referencia únicamente al cálculo de la imagen de primer orden de la fuente respecto a un plano de interés, que es aquella que se forma implicando a la fuente original y real y dicho plano, sobre el cual se producirá la reflexión del rayo que viajará de dicha fuente hasta el receptor. Es importante resaltar que se trata de la reflexión ya que con las imágenes de primer orden sólo se puede predecir el cálculo de esos rayos, como se ve en la figura 2.1.

Aparece ahora el concepto de imágenes de orden superior que permiten el cálculo de los rayos que sufren un mayor número de reflexiones en su trayectoria. Para el cálculo de estas imágenes de orden superior ya no se hace uso del transmisor, sino que se trabaja con una imagen de orden inmediatamente inferior y al igual que antes con el plano que sea de interés.

Si bien en el caso de rayos de una sola reflexión se sabe que ésta procede de la pared o plano a estudio, ahora para trayectorias más complejas se ven involucradas un mayor número de planos siendo la última reflexión procedente del plano sobre el que se calcula la imagen de orden superior de trabajo. El resto de reflexiones que atañen a la trayectoria del rayo se producen en las diferentes paredes sobre las cuales se han ido

calculando las imágenes de orden inferior y en el estricto orden en el que se han obtenido. Gráficamente todo esto queda resumido en la siguiente figura, en la que se obtiene un rayo que sufre dos reflexiones en su trayectoria de 'S' (fuente) hacia 'd' (receptor) [8]:

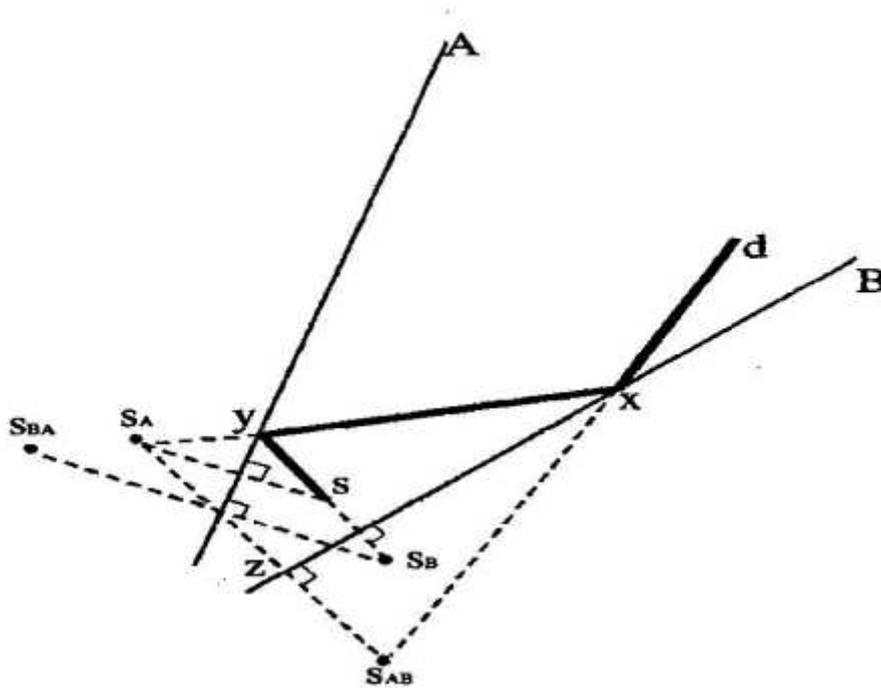


Figura 2.3. Imágenes de primer y segundo orden correspondientes a una fuente (S) situada entre dos espejos (A y B) [8]

Para este caso se observan dos imágenes de primer orden, por lo tanto de la fuente original, que serían SA y SB, las cuales obviamente se forman respecto a los planos A y B respectivamente. De segundo orden se observan SAB y SBA, las cuales observando los subíndices es fácil deducir que serían las imágenes de SA respecto al plano B y de SB respecto al A. Se puede decir, a la vista de esto, que las imágenes de orden superior son realmente imágenes de otras imágenes, que a su vez pueden ser imágenes de otras imágenes dependiendo del orden de la imagen que estemos obteniendo [10]. Por último, hay que hacer hincapié en que el rayo obtenido haciendo uso de la imagen SAB sufrirá la última reflexión en la pared que indica su último subíndice, en este caso B, siendo la segunda reflexión, y las anteriores reflexiones provendrán de los subíndices anteriores y en ese orden, siendo para este caso ya la primera reflexión y procedente de la pared A, siempre que se siga esta nomenclatura.

Es fácil deducir que para el caso de N planos en consideración y una única fuente transmisora se tendrán $N(N-1)$ imágenes de segundo orden, $N(N-1)(N-1)$ de tercer orden

y así sucesivamente. La energía alcanzará el punto de destino a través de las múltiples reflexiones que podemos calcular mediante éstas. Una vez que el rayo ha sido descrito mediante las reflexiones que sufre, la atenuación asociada con cada una de ellas se puede calcular fácilmente.

Por tanto el cálculo de las imágenes de diferente orden se perfila como un algoritmo recursivo donde hay una última consideración a tratar y es la validez o no de la imagen, entendiendo como tal la existencia de una reflexión ligada a dicha imagen.

Cabe destacar que aunque se desechen algunas imágenes para su análisis, ya que una determinada reflexión no se produce, no se debe olvidar que tanto ésta como todas las demás deben ser consideradas para obtener imágenes de orden inmediatamente superior, ya que aunque una imagen determinada, del orden que sea, no determine una reflexión posible, si lo puede hacer una imagen de orden superior formada a partir de ella. Esto es fácil de entender con el siguiente ejemplo: en un sistema simulado, no se producen rayos con una reflexión desde la fuente hasta el receptor, pero sí existen rayos con este destino que lleguen con dos o más reflexiones.

El método de las imágenes es eficiente por todo lo dicho anteriormente pero sólo se suele emplear en entornos simples debido al coste computacional que podría requerir.

2.1.2 Lanzado de rayos

Este método es la alternativa a la teoría de imágenes dentro de los modelos de trazado de rayos. Este método considera un haz de rayos transmitidos que pueden o no alcanzar el receptor. El número de rayos considerados y la distancia entre el transmisor y el receptor determinan la resolución espacial disponible y, por lo tanto, la exactitud del modelo. Este método requiere unos requisitos computacionales mayores que el método de la imagen [8].

El procedimiento consiste en determinar una cantidad finita de las posibles direcciones de propagación desde la fuente, normalmente con una separación angular constante. Si un rayo intercepta un objeto, entonces se genera un rayo reflejado y otro refractado. Si un rayo intercepta una cuña, entonces se genera una familia de rayos difractados. Para la recepción se suelen determinar esferas si trabajamos en 3D, o círculos si estamos trabajando en 2D. Estos círculos o esferas receptoras de radios adecuados

describen cada una de las zonas que reciben únicamente un rayo. Un rayo se tomará como recibido si su trayectoria intercepta el círculo de recepción. Para la construcción del círculo de recepción es necesaria la definición de un radio, denominado radio de impacto. Es entonces cuando la importancia mencionada del radio es crítica:

- Si el radio es demasiado grande, se pueden recibir dos rayos y el mismo rayo especular se puede contar dos veces.
- Si el radio es demasiado pequeño, es posible que ninguno de los rayos alcance la esfera de recepción y el rayo especular será excluido.

La siguiente figura muestra el tamaño apropiado de la esfera de recepción que puede recibir un rayo:

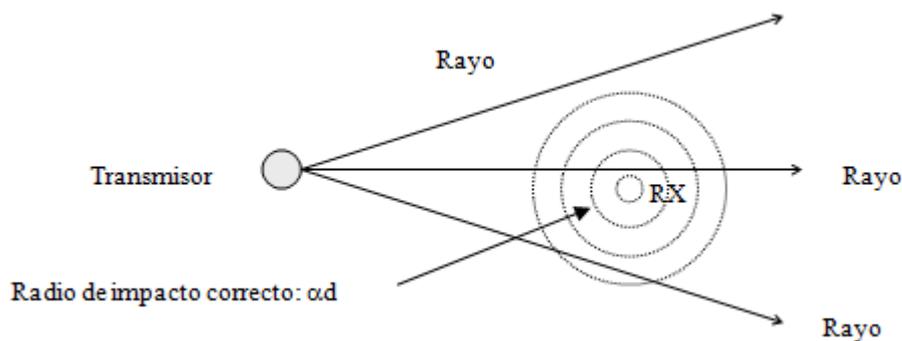


Figura 2.4. Radio de impacto de un receptor

Una parte de los rayos llegan al receptor. Para determinar qué rayos llegan al receptor se utiliza el círculo de recepción. El algoritmo de recepción se basa en la construcción de un área de recepción circular con centro en la posición del receptor. Un rayo se tomará como recibido si su trayectoria intercepta el círculo de recepción. Para la construcción del círculo de recepción es necesaria la definición de un radio, denominado *radio de impacto*.

El valor del radio será función de la separación angular de los rayos transmitidos (α) y de la distancia recorrida por el rayo en su trayectoria durante su propagación (no la

distancia directa entre el receptor y el transmisor). El radio de impacto puede expresarse de la siguiente manera: $R = \alpha \cdot d$ [10].

2.2 Análisis de los simuladores empleados

2.2.1 Trazador 3D de Rayos basado en la Teoría de Imágenes

Esta herramienta está desarrollada en Matlab y tiene una serie de características importantes a considerar. Principalmente hay que resaltar que está basada en el método de las imágenes por lo que conllevará asociado un alto tiempo de computación. Para evitar que el tiempo de computación no convierta en poco práctico el método, las características del entorno serán lo más simplificadas posible, no muy complejas y con un número de reflexiones no muy elevado. A pesar de estas limitaciones que imponemos para que el número de operaciones no llegue a ser excesivo, al ser un modelo semi-determinista podremos obtener resultados de una gran precisión.

Este simulador tiene una serie de parámetros a considerar [6]:

- La descripción del entorno a simular, que en el simulador conlleva también introducir la naturaleza del material de las superficies que forman dicho entorno (conductor perfecto o no, permitividad, conductividad...etc.).
- La interpretación correcta del entorno a simular, ya que los parámetros de un canal radio son muy dependientes de la localización y orientación de los obstáculos.
- Número de rayos a estudiar, en nuestro caso establecemos el número de reflexiones máximo que sufrirá un rayo a estudio.
- La situación del transmisor y del receptor, que pueden ser fijos o un móvil que se desplaza por una ruta con una forma lineal, circular o arbitraria.

- La implementación de un algoritmo de recepción apropiado, de forma que no se repita alguna contribución, para evitar la aparición de rayos redundantes.
- El cálculo de las reflexiones empleando las leyes de Snell y la Teoría de Imágenes u otro modelo.
- Un algoritmo y una formulación apropiada para los casos de rayos difractados en las esquinas del entorno.
- La condición de finalización de la propagación de un rayo, que puede ser por llegar a un número máximo de reflexiones, a una potencia mínima discernible en el receptor o porque el rayo no intersecta con ninguna superficie.
- La frecuencia de la simulación, si ésta es en banda estrecha, o la frecuencia portadora y el ancho de banda de la señal si la simulación es de banda ancha.

Un aspecto importante a explicar es el proceso de desarrollo del entorno a estudiar. Con la herramienta que estamos empleando podemos simular diferentes tipos de estructuras: habitaciones, pasillos, paredes con puertas y ventanas, etc. Cada pared tendrá sus propias características eléctricas y un valor de atenuación que sufrirá el rayo que la atraviese. Todas estas propiedades con las que definimos las estructuras a analizar nos permiten obtener resultados muy precisos y cercanos a las medidas reales como posteriormente comprobaremos.

Para el desarrollo de las diferentes estructuras que implementaremos, el Trazador 3D emplea paredes rectangulares ortogonales definidas por sus cuatro vértices de tres coordenadas cada uno. Estas paredes estarán contenidas únicamente en los planos X-Y, X-Z o Y-Z y serán ortogonales o paralelas entre sí. Cada pared será establecida de tal forma contendrá sus cuatro vértices y sus características radioeléctricas:

	Vértice 1	Vértice 2	Vértice 3	Vértice 4	5	6
1	Coord. X	Coord. X	Coord. X	Coord. X	Hor/Vert	At
2	Coord. Y	Coord. Y	Coord. Y	Coord. Y	ϵ_r	Perf_cond
3	Coord. Z	Coord. Z	Coord. Z	Coord. Z	σ	

Tabla 2.1. Formato de las paredes rectangulares de la estructura

Cada campo de la matriz representa:

- Cada vértice se define en una de las cuatro primeras columnas, tal como podemos observar en la Tabla 2.1. Todos los valores de posición con los que trabajamos serán metros (m).
- La primera fila de la quinta columna informa de la orientación de la pared rectangular, la cual puede ser horizontal, valor igual a cero, o vertical, valor a uno.
- La segunda fila de la quinta columna contiene el valor de la permitividad relativa de dicha pared.
- La última fila de la quinta columna muestra la conductividad de la pared en Siemens por metro (S/m).
- En la primera fila de la sexta columna está almacenada la atenuación que sufriría un rayo al atravesarlo en transmisión. El valor almacenado está en dBs.
- Por último almacenamos en la segunda fila de la sexta columna de nuestra matriz la variable de conductor perfecto, puesto a uno si lo fuera o a cero en caso contrario.

Para la creación de una geometría procederemos de la siguiente forma:

- Crear el script que contenga las matrices de las paredes y ejecutarlo. El nombre de cada pared en el script debe ser “planes(:, :, [numero de pared])”.
- Salvar el workspace, que sólo contendrá las paredes, con el formato de: “nombre_estructura.mat”.

A continuación, procederemos a exponer algunos ejemplos de estructuras creadas y como definimos las diferentes paredes que las constituyen:

Ejemplo de estructura con 4 habitaciones simple

La primera figura mostrada consiste en una sencilla estructura en forma de cubo, dividida en 4 habitaciones sin puertas, ventanas, ni ningún punto de acceso entre ellas. El tamaño de la estructura será de 10mx10mx10m. El transmisor lo representamos con un círculo azul y el receptor con uno rojo.

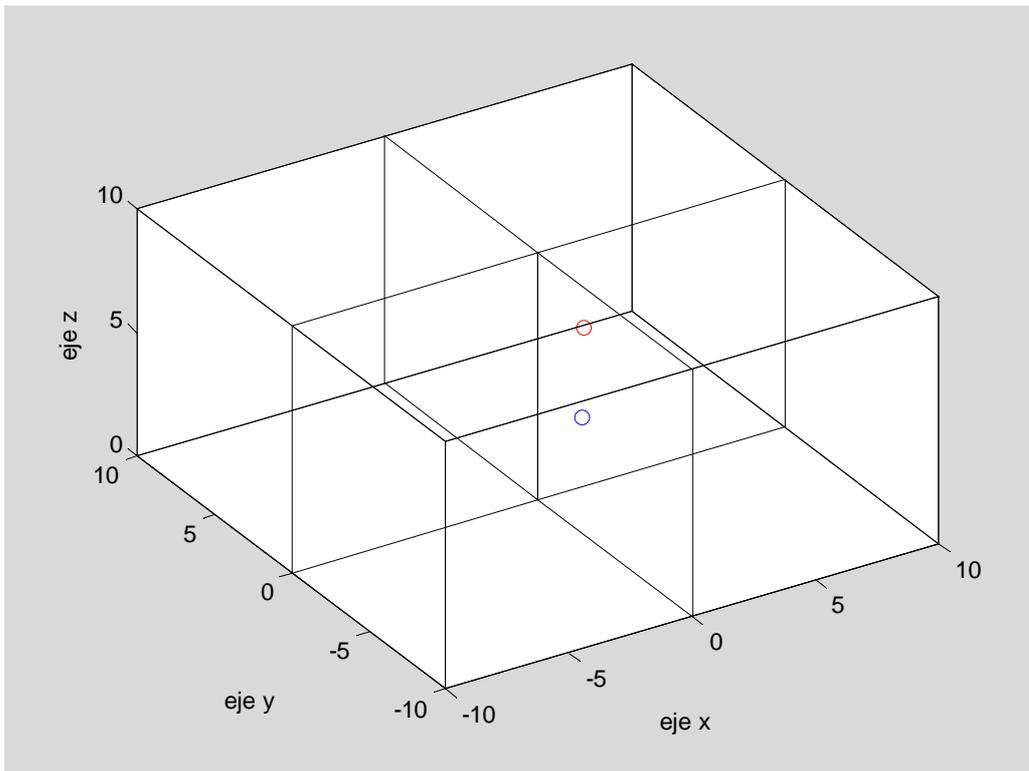


Figura 2.4. Representación 3D de la estructura

Otros ejemplos de estructuras:

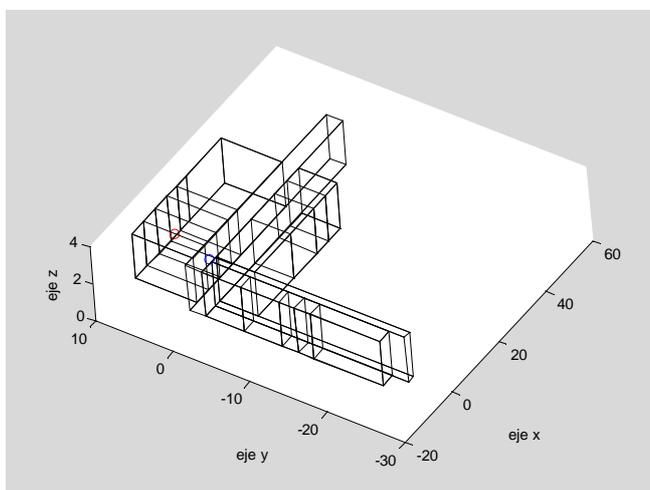


Figura 2.5. Representación 3D Corredor

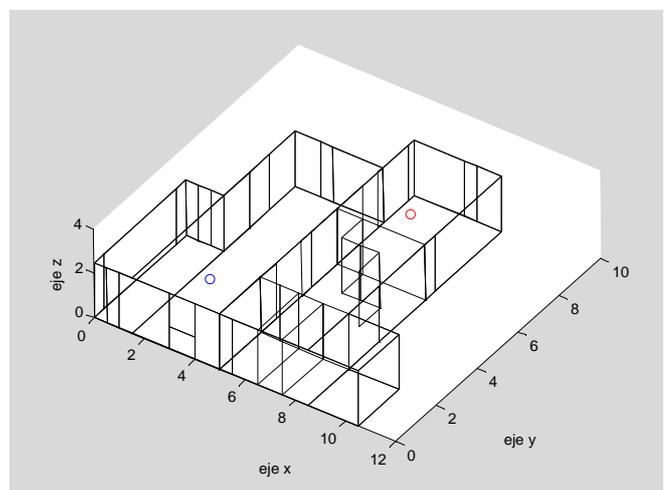


Figura 2.6 Representación 3D de una vivienda típica

En cualquier simulación que realicemos con la herramienta tendremos que establecer un límite en el número máximo de reflexiones en la simulación. Debido a que la herramienta está basada en la teoría de imágenes una manera sencilla de establecer este límite es el número máximo de reflexiones que sufre una onda en su camino hasta el

receptor. Por lo tanto en cada simulación el usuario deberá de introducir el número de reflexiones máximo que sufrirá un rayo a estudio.

En primer lugar se estudiará el caso de que haya visión directa entre el transmisor y receptor produciéndose comunicación directa. Evidentemente en este primer problema aún no se aplica la teoría de imágenes ya que no hace falta calcular puntos en los que se produzcan reflexiones sino que únicamente debemos de analizar la existencia o no de obstáculos en la trayectoria directa entre los dispositivos.

El trazado de rayos que la herramienta realiza es de manera ascendente en cuanto al número de reflexiones que sufren los rayos. Esto se traduce en que en primer lugar se trazarían los rayos que sufren una única reflexión a su llegada al receptor, luego los que sufren dos reflexiones y así sucesivamente, ya que haciendo uso de la teoría de imágenes realmente nos encontramos ante un problema recursivo y necesitamos de un cálculo o resultados anteriores para tratar un mayor número de reflexiones.

Cuando estudiamos la difracción en el simulador hay que tener presente que esta se considera únicamente con rayos directos desde la fuente con visión directa, es decir, no tendremos en cuenta la difracción producida en un rayo que provenga de una reflexión o difracción. Centrándonos en el caso considerado, una vez estudiados los rayos reflejados y transmitidos hasta la fuente, consideraremos los puntos de difracción como nuevos focos emisores desde los cuales estudiamos de nuevo los rayos hasta nuestro receptor que sufran como máximo el número de reflexiones introducido por el usuario.

La contribución por difracción al campo recibido es altamente dependiente de la geometría sobre la que incide la onda electromagnética. Es necesaria una correcta definición de la geometría de la arista, así como de los ángulos que forman con ella las ondas incidente y difractada hacia el receptor.

En la simulación sólo estudiaremos los rayos difractados que provienen directamente de la fuente. Es decir, el rayo antes de difractarse su única trayectoria es el

camino directo de transmisor hacia receptor con visión directa, por lo que tampoco se contempla que el rayo atravesase algún obstáculo antes de llegar al punto de difracción.

La máxima atenuación sufrida mediante la transmisión es fijada por el usuario como una variable de entrada. El valor máximo se fija como un umbral en dBs que ningún rayo en su camino debe superar atendiendo únicamente al mecanismo de transmisión, excluyendo las atenuaciones sufridas en rebotes o por la distancia.

Cualquier rayo puede atravesar una pared, tanto el rayo directo como uno reflejado o difractado, sufriendo la atenuación pertinente. Por ello, cada vez que calculamos en el programa una trayectoria, siempre analizamos si ésta atraviesa alguna pared de la estructura obteniendo un determinado número de transmisiones y la atenuación resultante. Si este valor no supera el umbral que mencionábamos tenemos un dato a tener en cuenta en el cálculo del campo de ese rayo.

A continuación vamos a exponer diferentes casos, para distintas posiciones del transmisor y receptor en unas determinadas estructuras para comprobar cómo se producen las distintas reflexiones y difracciones.

- Ejemplo 4 habitaciones

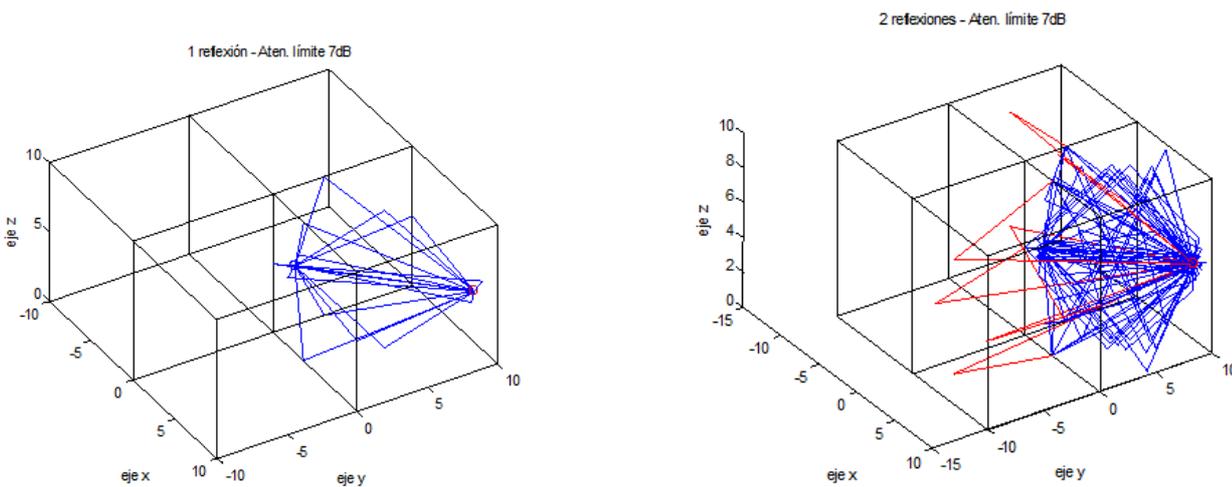


Figura 2.7. Representación 3D de los rayos reflejados que se producen cuando receptor y transmisor están en la misma habitación para 1 y 2 reflexiones máximas.

Podemos observar la alta complejidad de los resultados obtenidos cuando aumenta el número máximo de reflexiones permitido, como en el caso de la figura de la derecha. Este número máximo de reflexiones se define como el número máximo de veces que un rayo podrá reflejarse en una pared hasta llegar al receptor.

Para el caso de estar el transmisor y receptor en diferentes habitaciones:

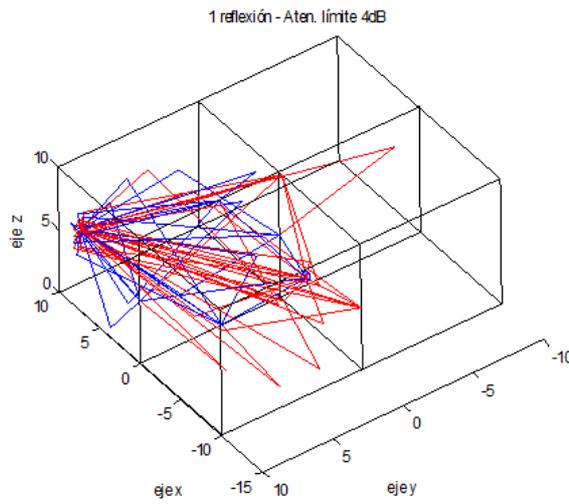


Figura 2.8. Representación 3D de los rayos reflejados que se producen cuando receptor y transmisor están en distinta habitación

- Ejemplo Escalón

La situación más simple en la que podríamos pensar para testear el correcto funcionamiento de los rayos difractados sería una estructura en forma de escalón que presentara una esquina donde producirse el fenómeno.

La fuente y el transmisor están situados en las coordenadas $[-4; -2; 4]$ y $[3; 3; 8]$ respectivamente.

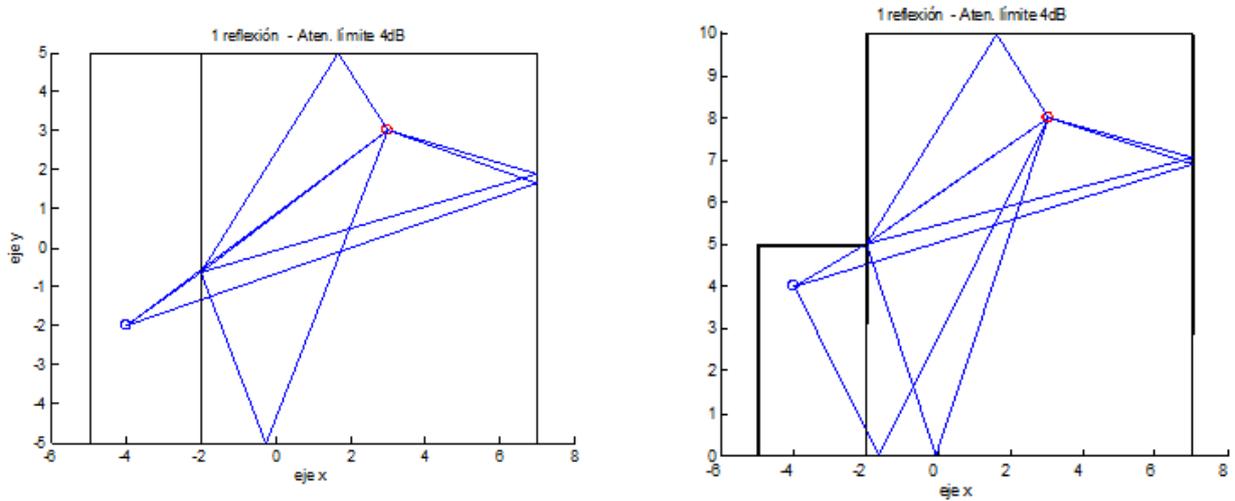


Figura 2.9. Representación en eje XY y eje XZ de los rayos difractados y reflejados en una estructura escalón

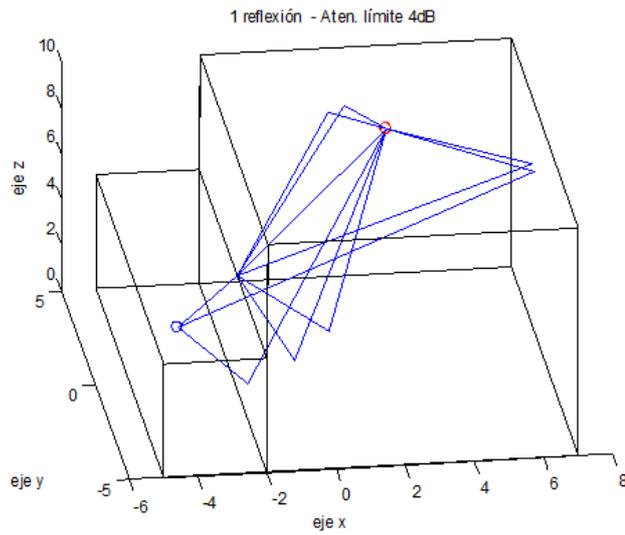


Figura 2.10. Representación 3D de los rayos difractados y reflejados en una estructura escalón

Podemos observar el efecto de la difracción en la propagación de los rayos.

Ahora situamos al transmisor en la posición $[-4; -8; 8]$, y al receptor en el interior en $[3; -2; 8]$:

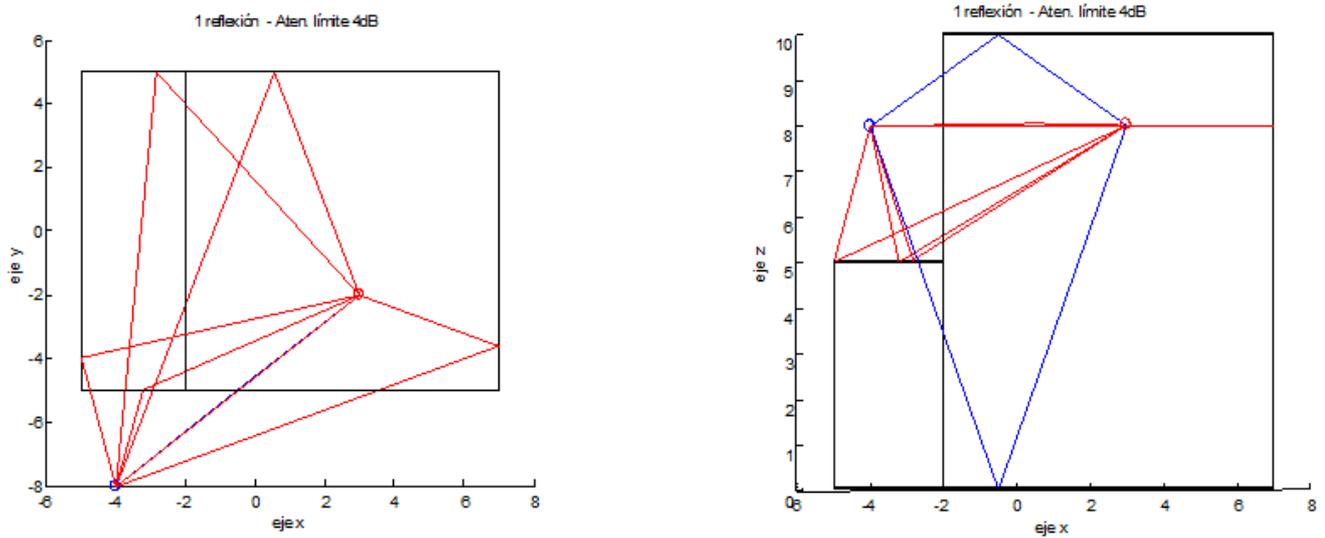


Figura 2.11. Representación en eje XY y eje XZ de los rayos difractados y reflejados en una estructura escalón con el transmisor fuera de la estructura

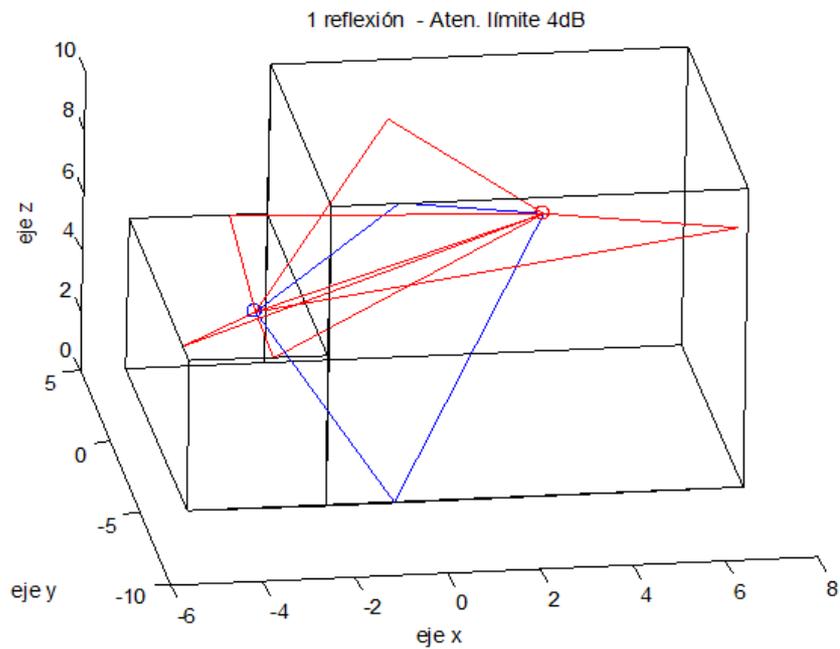


Figura 2.12. Representación 3D de los rayos difractados y reflejados en una estructura escalón con el transmisor fuera de la estructura

Como podemos observar los rayos que atraviesan alguna pared y sus posteriores reflexiones se representan en rojo, los que no, se representan en azul.

- Corredor

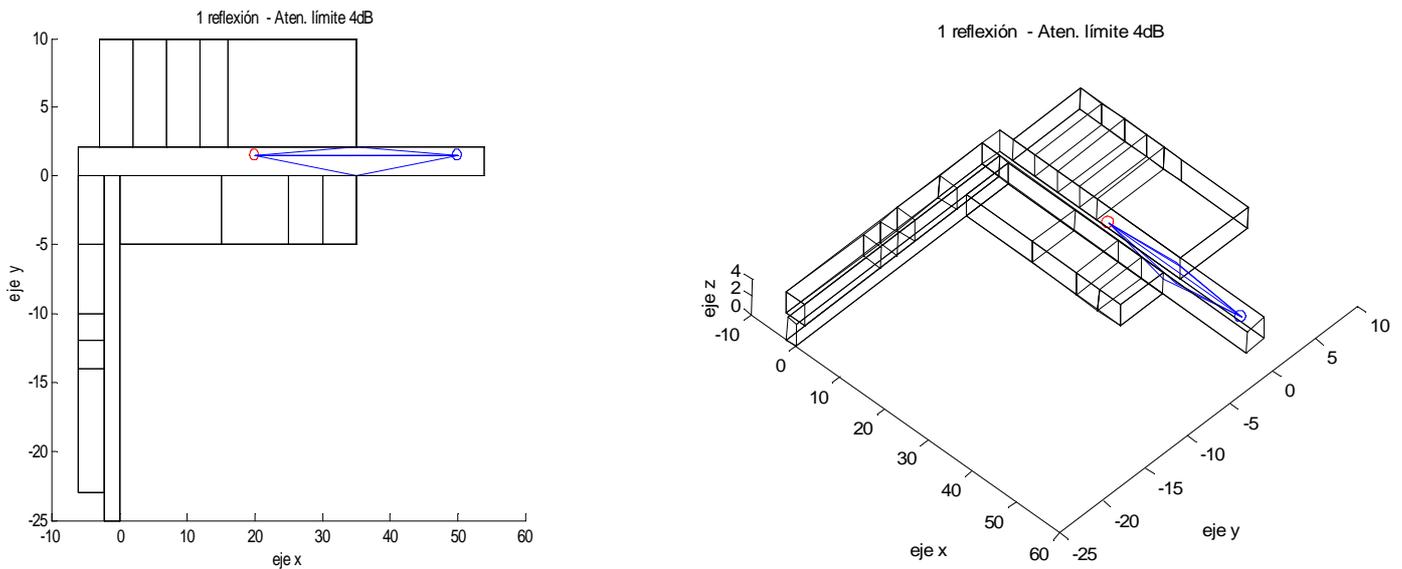


Figura 2.13. Representación de los rayos reflejados en un corredor

- Estructura Vivienda[Los]

La estructura se basa en una casa residencial típica, situada en este caso en la ciudad de Rennes [Los]. La casa está compuesta por los materiales comunes de paredes (cemento, ladrillo, yeso...), suelos (azulejos, parqué), puertas, etc. Tiene grandes ventanales, una chimenea, etc.

En primer lugar, colocaremos el transmisor y receptor en diferentes puntos de la casa, para comprobar cómo se producen las reflexiones y difracciones de los rayos.

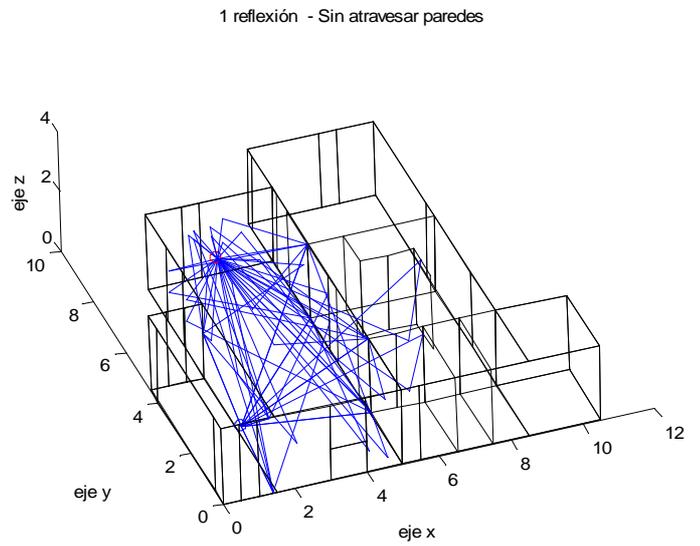
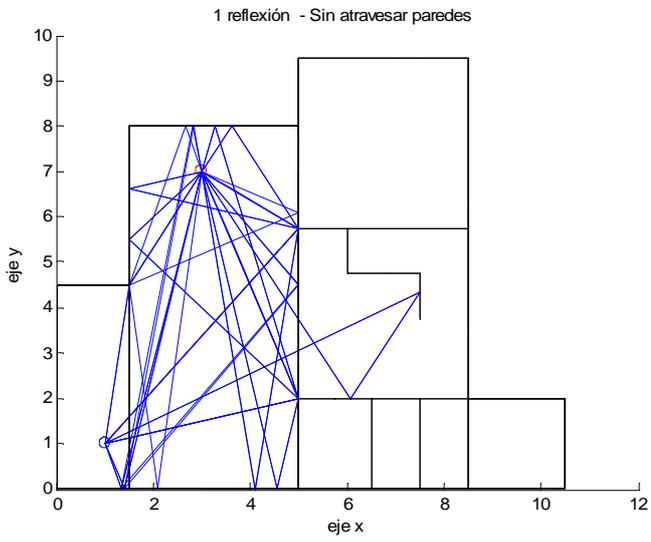


Figura 2.14. Representación de los rayos reflejados y difractados sin atravesar paredes

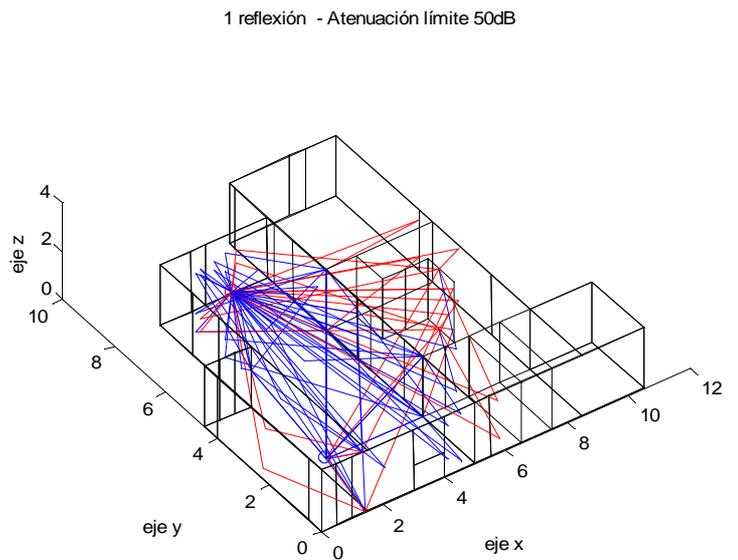
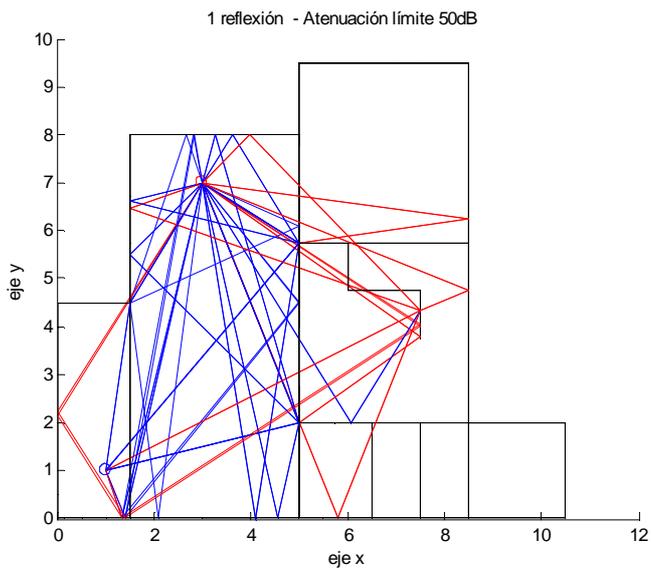


Figura 2.15. Representación de los rayos reflejados y difractados (1 sola reflexión)

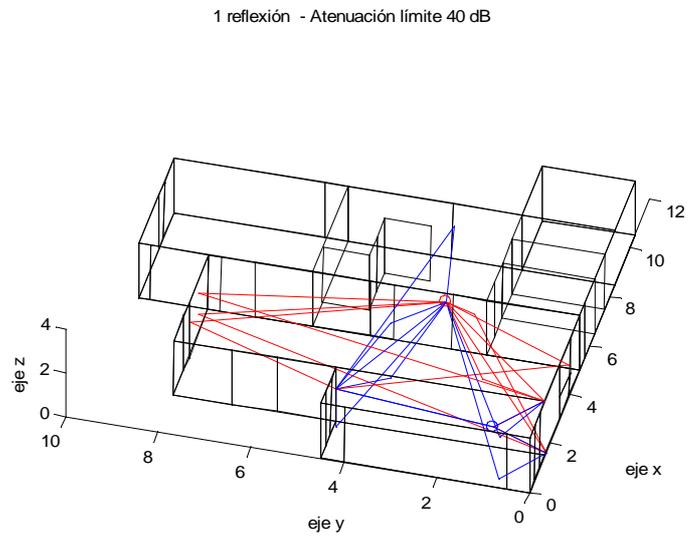
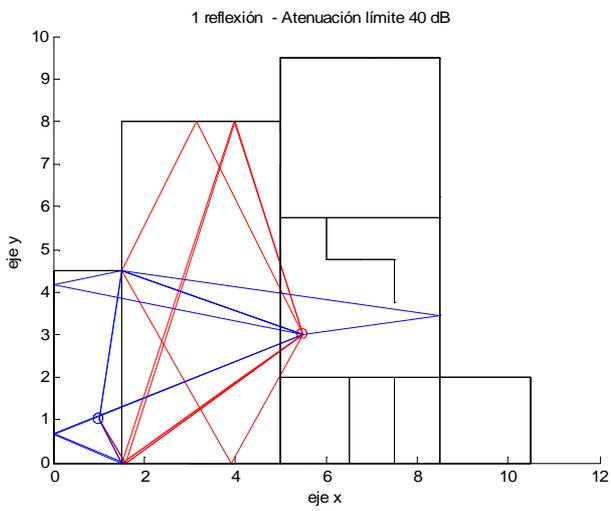


Figura 2.16. Representación de los rayos reflejados y difractados de 1 sola reflexión.

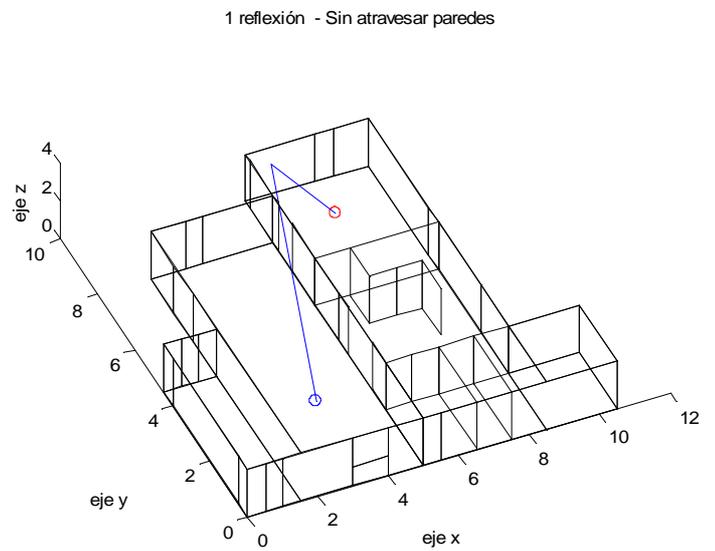
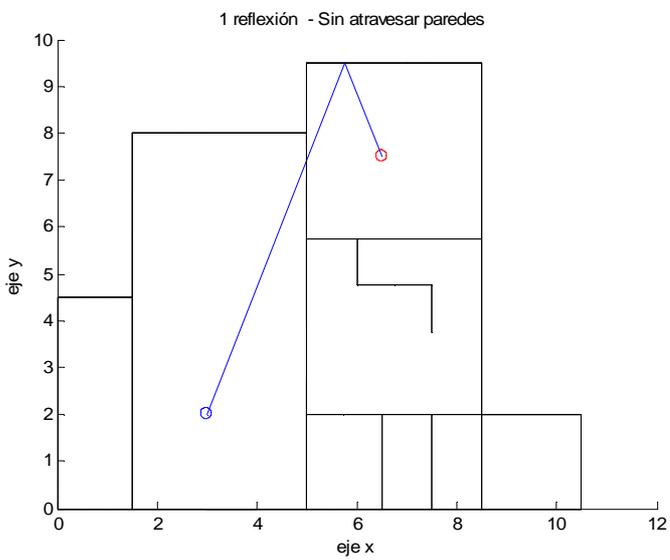


Figura 2.17. Representación de los rayos reflejados y difractados sin atravesar paredes

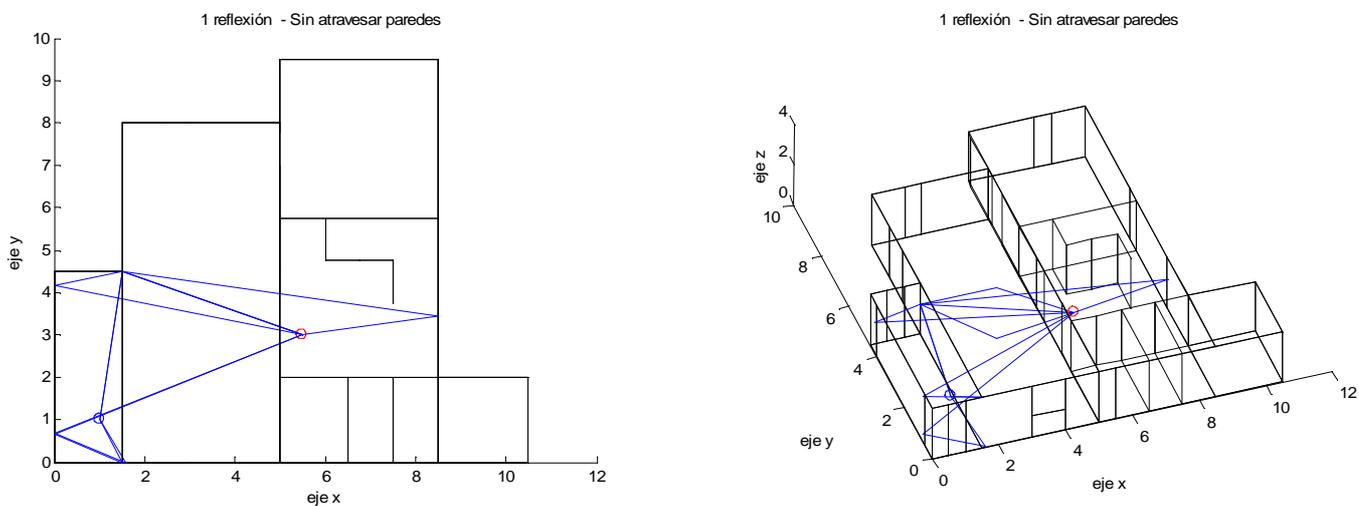


Figura 2.18. Representación de los rayos reflejados y difractados sin atravesar paredes (1 sola reflexión)

Tras estas primeras simulaciones para comprobar el correcto funcionamiento de la propagación de los rayos, podemos sacar varias conclusiones.

La primera conclusión es la complejidad en la definición de estructuras. Esto se debe a que cada una de las paredes se crea individualmente con sus características específicas. Además si la geometría es compleja como por ejemplo en la Estructura Vivienda [Los], el diseño de estas se puede convertir en una ardua tarea.

Otro de los aspectos que se ha comentado anteriormente es el alto tiempo de computación que requiere cada simulación del trazador.

Figura	Tiempo de cómputo
2.14	7 mins 21 segs
2.16	2 mins 48 segs
2.17	22 segs

Tabla 2.2. Tiempos de cómputo dependiendo de las reflexiones que se producen

Como podemos observar en la siguiente tabla el tiempo de computación irá directamente ligado al número de rayos que la herramienta tenga que crear. Se observa que para el caso de la Figura 2.14 se producen más reflexiones debido a la posición en que se encuentran situados el transmisor y receptor. En este caso el tiempo de cálculo empleado por el simulador es superior a los otros dos casos mostrados en la tabla. Aparte de la ubicación del transmisor y receptor hay otros factores que influyen en el tiempo de computación como son el número máximo de reflexiones y la atenuación en las paredes.

El número máximo de reflexiones que sufre cada rayo es el factor más determinante. Conforme mayor sea este valor más tiempo se requerirá para obtener los resultados finales. Podemos observar un ejemplo muy gráfico en la Figura 2.7.

La segunda variable que está relacionada con el tiempo de computación, aunque de una manera menos influyente, es la atenuación máxima que puede sufrir cada rayo. Si introducimos valor muy bajo para esta atenuación límite los rayos no podrán atravesar muchas paredes con lo que el número de rayos disminuirá. En la Figura 2.14 forzamos a que no se puedan atravesar paredes introduciendo una atenuación límite de 0 dBs. Sin embargo, en la Figura 2.15, dicho valor límite lo variamos a 40 dBs, y podemos evidenciar las diferencias que existen entre ambas gráficas, observando en color rojo los rayos que atraviesan las paredes, los cuales seguirán sufriendo posteriormente sucesivas reflexiones lo que implica un tiempo de cálculo superior al otro ejemplo.

Con todo ello, y como presentaremos en posteriores capítulos, a pesar de estos inconvenientes de velocidad de la simulación, los resultados que obtendremos serán muy precisos y similares a las mediciones reales.

2.2.2 Lanzador de Rayos

Para el desarrollo de este proyecto emplearemos un segundo simulador basado en el lanzamiento de rayos. Éste nos servirá para comparar resultados con el Trazador 3D y los estudios teóricos y observar las principales diferencias. Con ello conseguiremos estimar cuál de los dos simuladores es más preciso y obtiene mejores resultados.

Una de las diferencias entre ambas herramientas es que el Lanzador de Rayos está desarrollado en C++ en el entorno de desarrollo Borland y sus análisis del entorno se realizan en 2D-2.5D (cuando se considera una reflexión en el suelo). Se ha optado por una programación orientada a objetos ya que es idónea para el tratamiento de elementos como los rayos, las esquinas, las listas enlazadas de las mismas. Tiene el inconveniente de que las paredes tendrán todas las mismas características. Al contrario que el Trazador, con el que podíamos crear cada pared con sus propiedades. Por todo ello, parece lógico que el Trazador realizado con Matlab obtendrá resultados mucho más reales que este último simulador presentado. En capítulos posteriores se presentarán diferentes casos donde queden demostradas todas estas afirmaciones.

Ambos simuladores también difieren en la forma de cargar la estructura o geometría a estudiar. Para el lanzador la forma de representar la información contenida en una trama urbana es el formato vectorial DXF, donde se representan las formas de los edificios mediante elementos geométricos como líneas, puntos, círculos, arcos, etc. Cada elemento es conocido como una entidad. La información contenida en un fichero DXF está representada con caracteres ASCII y puede generarse con un programa de diseño gráfico asistido por ordenador como AUTOCAD.

En la simulación de la propagación radioeléctrica se va a emplear una descripción del entorno que no corresponde fielmente al entorno real, cuya representación exacta sería muy compleja y que provocaría un aumento significativo del tiempo de computación del algoritmo de lanzado de rayos.

La mayor parte de los bloques de edificios pueden representarse por una sucesión de líneas rectas con el que el simulador sólo tiene en cuenta la trama urbana formada por uniones de rectas.

Las rectas en un fichero DXF se representan de dos formas:

- a) Mediante entidades del tipo LINE, que describen una recta entre dos puntos.
- b) Mediante entidades del tipo POLYLINE, que describen un conjunto de segmentos consecutivos que pueden descomponerse en varias rectas.

El simulador se encarga de leer la información contenida en un fichero DXF que describa el entorno a simular. El programa convierte cada línea de la vista plana en una pared con unas características de conductividad, permitividad compleja, material absorbente o conductor y de rugosidad. En consecuencia la información de posición de la línea se convierte en la ubicación de una pared con unas características físicas que determinan su comportamiento respecto al campo eléctrico radiado.

Uno de los principales problemas encontrados al ejecutar el programa ha sido cargar los archivos DXF creados para su visualización. Con Matlab se consigue leer cualquier archivo DXF desarrollado en AUTOCAD, sin embargo el lanzador no lo lograba de manera efectiva.

Para poder solucionar este problema, tan sólo hay que guardar la estructura creada en AUTOCAD como 'DXF AUTOCAD R12/LT2'. De esta forma el simulador funciona correctamente.

Las paredes no se consideran una a una de forma aislada, sino que es necesario tomar en cuenta las intersecciones (esquinas). Estas esquinas, tienen un papel muy importante en la propagación radioeléctrica ya que son centros de difracción. Las esquinas no están descritas directamente en la información vectorial, pero es posible conocer su posición ya que las líneas están descritas como vectores entre dos puntos, por lo tanto las esquinas están allí donde dos entidades de tipo línea tienen uno de los dos puntos en común.

De igual forma que con los planos sobre papel, la representación vectorial de tramas urbanas puede tener un factor de escala. Este factor es fundamental para distinguir entre las magnitudes físicas reales y las representadas en el fichero DXF. En el simulador se emplean las distancias en la escala de la representación vectorial para los cálculos del lanzador de rayos, pero a la hora de calcular magnitudes como el campo eléctrico recibido se utiliza la escala física.

El simulador implementado se ha diseñado para actuar en un entorno microcelular *outdoor*, por lo tanto no se ha tenido en cuenta el grosor de las paredes cuya influencia sólo se notaría en los rayos transmitidos por el material. Así pues las paredes están

definidas sólo por su cara exterior. Esto implica otra diferencia importante con el Trazador, puesto que no considera que las paredes tengan diferentes atenuaciones al ser atravesadas un raro según las propiedades del material que las constituya del grosor del mismo. Otro factor significativo de la mayor precisión del primer simulador respecto a este último.

Por último mencionar, y como indicaremos en el siguiente capítulo, la principal ventaja del Lanzador de Rayos es su menor tiempo de computación con respecto al Trazador 3D. Característica muy importante y a considerar para analizar la conveniencia de utilizar uno u otro programa según la situación a estudiar. A pesar de todo, los códigos de ambos simuladores son optimizables.

Antes de iniciar una simulación hay que ubicar el transmisor y el receptor dentro del entorno DXF. Hay que tener en cuenta que las coordenadas que describen la posición de éstos son relativas a los valores del fichero, no a su posición física. Así pues, sobre la descripción de la trama urbana se estudia inicialmente la posición del transmisor y el receptor de forma que se obtenga el resultado buscado.

El transmisor y los receptores también se caracterizan por su altura. El transmisor puede tener una altura distinta a la de los receptores, sin embargo estos tienen todos la misma altura, ya que se emplean para calcular la cobertura de una zona o el campo que recibe un receptor móvil.

Hasta el momento todo lo que se ha comentado se refiere a una simulación en dos dimensiones (vista plana del entorno urbano). En este caso hay varias limitaciones claras: las antenas transmisora y receptora están a la misma altura, no se tiene en cuenta el fenómeno de la reflexión en el suelo, el diagrama de radiación de las antenas depende del ángulo de salida en azimut y en elevación. Se ha considerado necesaria la adición de la reflexión en el suelo asociada a cada impacto recibido en el receptor [12], así como la definición de distintas alturas entre el transmisor y el receptor para simular casos reales.

La adición de la reflexión en el suelo se basa en la distinta altura de las estaciones base y receptora, así como en la distancia recorrida por el rayo en dos dimensiones. Así el rayo que llega al receptor sigue un recorrido tridimensional referido a la distinta altura del

transmisor y receptor. El rayo continua con el mismo trayecto, pero con una reflexión en el suelo. A esto se le conoce como lanzador 2'5D. [10]

El simulador tendrá los siguientes parámetros de entrada:

- 1) Frecuencia de trabajo.
- 2) Número de rayos a lanzar para el transmisor y para las esquinas difractoras.
- 3) Se indica si se permite la difracción o no.
- 4) Valores de la conductividad y la permitividad relativa de los materiales.
- 5) Tipo de material: conductor, absorbente, dieléctrico.
- 6) Posición del transmisor.
- 7) Tipo de ruta de recepción y posición de los receptores.
- 8) Altura del transmisor y de los receptores.
- 9) Ruta de acceso al fichero que contiene la descripción DXF del entorno.
- 10) Ruta de acceso al fichero que guarda los resultados de la simulación.
- 11) Valores de altura máxima de la rugosidad y desviación estándar para la dispersión.
- 12) Indicador de si se emplea el desarrollo de términos de orden superior para la difracción y valor del orden.
- 13) Tipo de resultado a generar (pérdidas o perfil de retardo).
- 14) Tipo de simulación: estudio para un frecuencia o en frecuencia (frecuencia central y ancho de banda).

El resultado de la simulación se escribe en un fichero (cuyo nombre se introduce en la toma de datos). El formato del fichero es distinto según el tipo de simulación elegido. Si se elige el estudio de las pérdidas en la posición de los receptores se obtiene un fichero ASCII con los siguientes datos en cada columna:

- 1) Valor de las pérdidas en cada receptor, en dB.
- 2) Número de impactos recibidos en cada receptor.
- 3) Valor de la parte real del campo eléctrico recibido en V/m.
- 4) Valor de la parte imaginaria del campo eléctrico recibido en V/m.
- 5) Módulo del campo eléctrico recibido en V/m.
- 6) Posición en ordenadas del receptor, respecto al formato DXF.
- 7) Posición en abscisas del receptor, respecto al formato DXF.

Si se elige el estudio del perfil de retardo para un receptor individual se obtienen los siguientes datos en cada columna de un fichero ASCII:

- 1) Valor de las pérdidas para cada impacto recibido, en dB.
- 2) Valor de la parte real del campo eléctrico recibido en V/m.
- 3) Valor de la parte imaginaria del campo eléctrico recibido en V/m.
- 4) Módulo del campo eléctrico recibido en V/m.
- 5) Tiempo que tarda en llegar desde el transmisor al receptor, en nseg.
- 6) Número de reflexiones de cada impacto. Es nulo para rayos directos, rayos difractados directos y rayos doblemente difractados.
- 7) Posición en ordenadas del origen del impacto, respecto al formato DXF.
- 8) Posición en abscisas del origen del impacto, respecto al formato DXF.
- 9) Posición en ordenadas del receptor, respecto al formato DXF.
- 10) Posición en abscisas del receptor, respecto al formato DXF.
- 11) Ángulo en elevación del impacto, en radianes.

La separación en columnas de los datos guardados en cada fichero permite un mejor tratamiento de los mismos dentro del programa MatLab.

2.3 Características eléctricas de los materiales a 60 GHz

La caracterización dieléctrica de materiales en radiofrecuencia ha sido desarrollada ampliamente en los últimos tiempos. En concreto, la planificación de los sistemas de comunicaciones móviles requiere el conocimiento de una amplia variedad de entornos donde se produce la propagación radioeléctrica. Los modelos de trazado de rayos asumen que los fenómenos de propagación en la banda de microondas pueden estudiarse a partir de modelos basados en la óptica geométrica. Los mecanismos de propagación son la reflexión, la transmisión, la difracción y la difusión [17]. Por tanto, es crucial determinar los valores de la permitividad relativa de los materiales de construcción que se utilizan

tanto en entornos interiores como exteriores. Una incorrecta caracterización de los materiales inducirá a simulaciones erróneas.

Para caracterizar las propiedades electromagnéticas de los materiales existen dos métodos: de resonancia y de no resonancia; los métodos de resonancia se utilizan para obtener un conocimiento preciso de las propiedades dieléctricas del material electromagnético, mientras que el método de no resonancia se utiliza para obtener un conocimiento general de las propiedades electromagnéticas del material. Este último método, por su naturaleza, y la forma de realizar las medidas, sirve como modelo conceptual para ser aplicado a la caracterización de materiales [9].

Los métodos no resonantes se basan en la teoría de propagación de microondas. El cálculo de las propiedades de los materiales se deduce de la impedancia y de la velocidad de onda sobre el material. En la figura 2.19 se representa de manera general el comportamiento de una onda electromagnética que viaja en el espacio libre e incide sobre un material desconocido. Este impacto genera una onda transmitida a través del material y una onda reflejada en la interfaz del material. La medida de la onda reflejada y la transmitida, proporciona información para la deducción de la permitividad eléctrica y la permeabilidad magnética.



Figura 2.19. Comportamiento de una onda que incide sobre un material [11]

Los métodos no resonantes necesitan de líneas de transmisión para dirigir la onda incidente a través del material. Estas líneas pueden ser cables coaxiales, guías de onda y el espacio libre. Existen dos métodos no resonantes [11]:

- Método de reflexión. En este método una señal electromagnética se hace incidir sobre el material bajo estudio, y de la onda que se refleja se determina el coeficiente de reflexión y se deducen las propiedades eléctricas y magnéticas del material. Sólo es posible medir un parámetro, ya sea la permitividad eléctrica o la permeabilidad magnética.
- Método de transmisión y reflexión. En este método la muestra del material bajo estudio se inserta en medio de la línea de transmisión, y del tipo de medio de transmisión depende el principio de funcionamiento de método. Las propiedades de permeabilidad y permitividad se deducen de la reflexión de la señal en la muestra del material y de la señal que se transmite a través de él. Como todos los parámetros de dispersión se pueden medir, se cuenta con más datos de medida que con el método de reflexión.

La siguiente tabla recoge las características eléctricas de los materiales más empleados en los entornos estudiados. Se ha hecho una recopilación de información de diferentes artículos [18] [19] [17] para tener de manera condensada todos los datos. En ella aparecen la permitividad compleja, conductividad y atenuación obtenidas por técnicas de transmisión y reflexión.

Material	Permitividad Compleja	Conductividad [S/m]	Atenuación [dB/cm]
Cemento [17]	6,5-0,43j	1,43	6.67
Cemento [18]	6,14-0,3011j	1,43	6.67
Madera [18]	1,54-0,095j	0,32	4.22
Azulejos [18]	6,3-0,35j	1,19	7.81
Ladrillo [15]	6,3-0,35j	1,17	4.45
Yeso [15]	2,81-0,046j	0,15	1.51
Yeso [22]	2,58-0,091j	0,15	1.51
Yeso [17]	2,25-0,03j	0,15	1.51
Cristal [15]	6,94-0,176j	0,59	6.05
Cristal [17]	6,81-0,17j	0,59	6.05
Aglomerado [15]	1,57-0,096j	0,32	5.15
Aglomerado [22]	2,95-0,19j	0,32	5.15
Aglomerado [18]	2,86-0,016j	0,32	5.15

Piedra [18]	6,81-0,27j	0,91	5.73
Mármol [18]	11,56-0,077j	0,25	1.25
Hormigón celular [18]	2,26-0,1j	0,34	3.70
Cristal acrílico [18]	2,53-0,03j	0,1	1.03
Entarimado [17]	3,91-0,33j	1,1	3.54

Tabla 2.3. Tabla de las características eléctricas para diferentes materiales

Los materiales dieléctricos más comunes en los entornos de propagaciones móviles (ladrillo, cemento, madera, asfalto, etc.) son bastante secos y tienen una permitividad relativa baja. Sin embargo, el valor de la permitividad relativa se puede incrementar debido a la humedad del aire casi todos los materiales contienen algo de agua, el contenido típico de humedad en interiores ronda el 5-10% dependiendo por ejemplo de la estación y si está al aire libre tienen un poco más [17]. Por lo tanto las propiedades eléctricas del agua son importantes. Por supuesto parte de la propagación tiene lugar en el aire y especialmente en las frecuencias con ondas de longitud de ondas milimétricas es importante conocer el comportamiento de la permitividad del aire.

Hay materiales cuya permitividad varía con el tiempo y en este tipo de materiales es de especial importancia el conocimiento de cómo cambian estas propiedades temporalmente. Un claro ejemplo de este tipo de casos, es el cemento. Se observa que las variaciones debidas a los incrementos temporales tienen mayor trascendencia en la parte imaginaria del índice de refracción y en el coeficiente de transmisión, mientras que la parte real no sufre grandes variaciones.

Es importante destacar también, que los valores medidos son más parecidos a los teóricos cuanto más homogéneo sea el material. Para los elementos que no lo son, los resultados tendrán una amplia varianza.

En definitiva, el propósito de estas estimaciones es modelar la propagación de la onda, y caracterizar las propiedades de los materiales ya que no existe suficiente conocimiento e información de las mismas a esta frecuencia. El coeficiente de atenuación varía entre 1 dB/cm a 8 dB/cm como podemos observar en la Tabla 2.3, lo que nos lleva a

la conclusión de que el aislamiento entre habitaciones, o entre escenarios outdoor o indoor, dependerá del tipo de material empleado.

Capítulo 3

Análisis del rendimiento y eficacia del Trazador 3D. Comparación con el lanzador de rayos

Básicamente en este capítulo contrastaremos los resultados obtenidos con estudios teórico-prácticos realizados por diversos autores con lo que mediremos el grado de precisión de nuestro simulador. Inicialmente, mostraremos diversas simulaciones para comprobar el correcto funcionamiento de nuestra herramienta.

Un factor importante en cada simulación será el tiempo de cómputo empleado. Como observaremos una de los principales inconvenientes del Trazador 3D será su velocidad de computación. Por ello tras el análisis de cada estructura, indicaremos el tiempo que se ha empleado para obtener los resultados.

Las simulaciones se realizarán en un PC con un procesador Intel® Pentium® Dual CPU E2160 @ 2 Ghz y con memoria RAM de 3 Gb.

3.1. Comprobación de la precisión y rendimiento Trazador 3D

En primer lugar, estudiaremos diferentes tipos de geometrías mediante el Trazador 3D. Se empezará analizando la estructura de 4 habitaciones para analizar el efecto que tienen las paredes al ser atravesadas por los rayos. Según el tipo de pared se sufrirá más o menos atenuación, y la posición del transmisor también será de vital importancia.

Posteriormente se examinará una estructura tan simple como una esquina. Con ello se estudiará detalladamente el efecto de la difracción. Y para finalizar se realizarán diversas simulaciones en un corredor y en una casa de una planta [15] para analizar estructuras más complejas que nos acercarán a situaciones reales, lo cual es el objetivo final de este proyecto.

3.1.1. Estructura de 4 habitaciones

Comenzaremos con una estructura simple de 4 habitaciones, cuyas paredes supondremos que serán de cemento con una permitividad de $6.5-0.43j$, una conductividad de 1.43 y una atenuación total de 16 dB. Emplearemos los siguientes datos iniciales:

Frecuencia	60 Ghz
Nº máximo de rayos reflejados	2
Nº máximo de rayos reflejados tras difracción	2

Tabla 3.1. Datos iniciales para la estructura de 4 habitaciones

Gráficamente representamos la estructura:

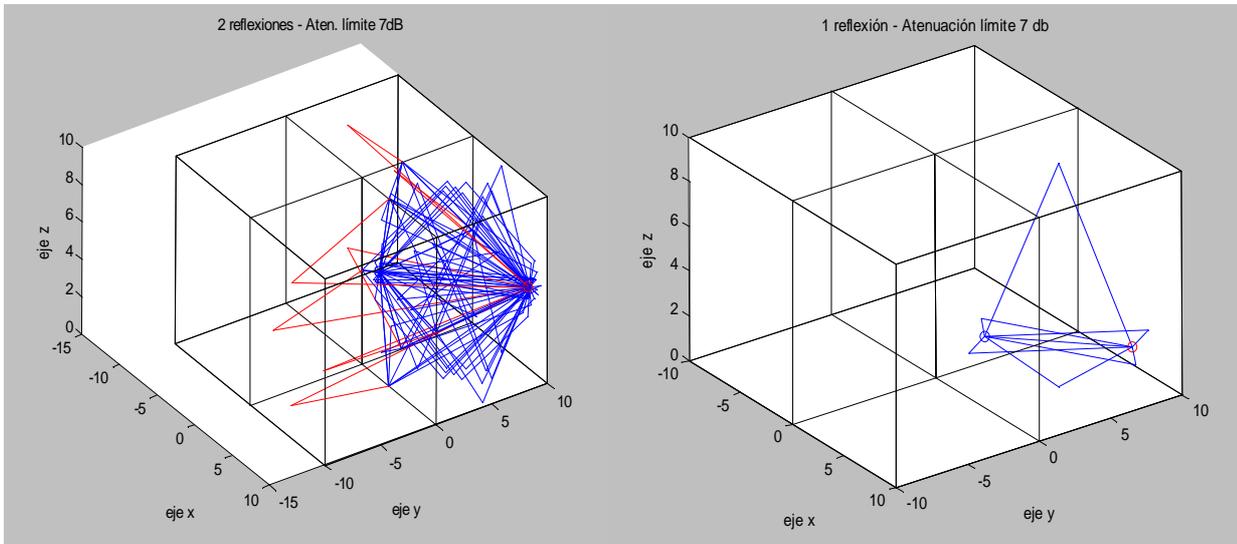


Figura 3.1. Estructura de 4 habitaciones

En esta figura podemos contemplar que existen cuatro habitaciones separadas por paredes simples, sin puertas ni ventanas. A la vez, se muestran las distintas reflexiones que se producen. Por un lado las reflexiones que se generan en el interior de la habitación donde queda ubicado el transmisor (rayos azules), y por otro lado las reflexiones que atraviesan las paredes (rayos rojos).

En esta simulación se ha impuesto la condición de que cada rayo sufra un número máximo de reflexiones, y tal como podemos observar se cumple dicha condición. Otra imposición es una atenuación límite de 7 dB. Por ello, no existen un gran número de rayos que atraviesan las paredes, pues llegan a dicho límite de atenuación enseguida.

A continuación, realizaremos una simulación en la que el transmisor estará fijo y el receptor se moverá de la siguiente forma para una frecuencia de 60 GHz:

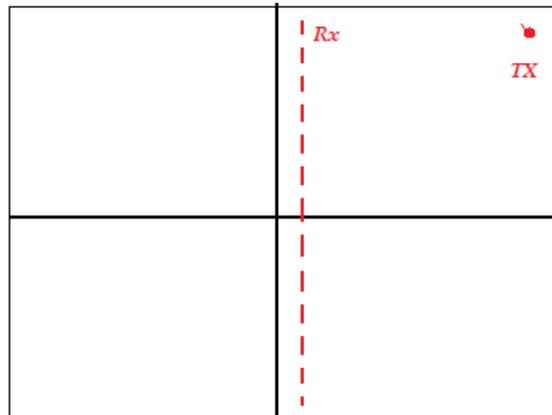


Figura 3.2. Movimiento del receptor respecto al transmisor

El receptor se desplazará desde el punto más alejado hasta el más cercano y representaremos el campo eléctrico que recibirá este:

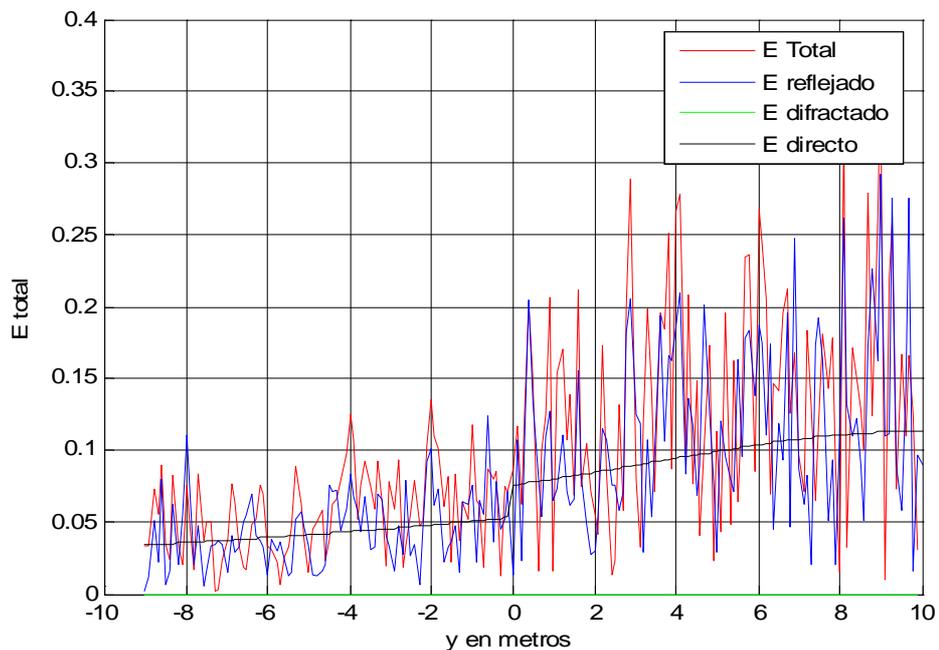


Figura 3.3. Campo eléctrico recibido por Rx en un movimiento lineal para una frecuencia de 60 GHz

Observamos como el nivel del campo eléctrico recibido es mayor cuando ambos dispositivos (receptor y transmisor) se encuentran en la misma habitación. Se puede realizar una comparativa a diferentes frecuencias para observar el efecto de la frecuencia en la atenuación de la onda electromagnética. Por ejemplo para 60 GHz y 1 GHz:

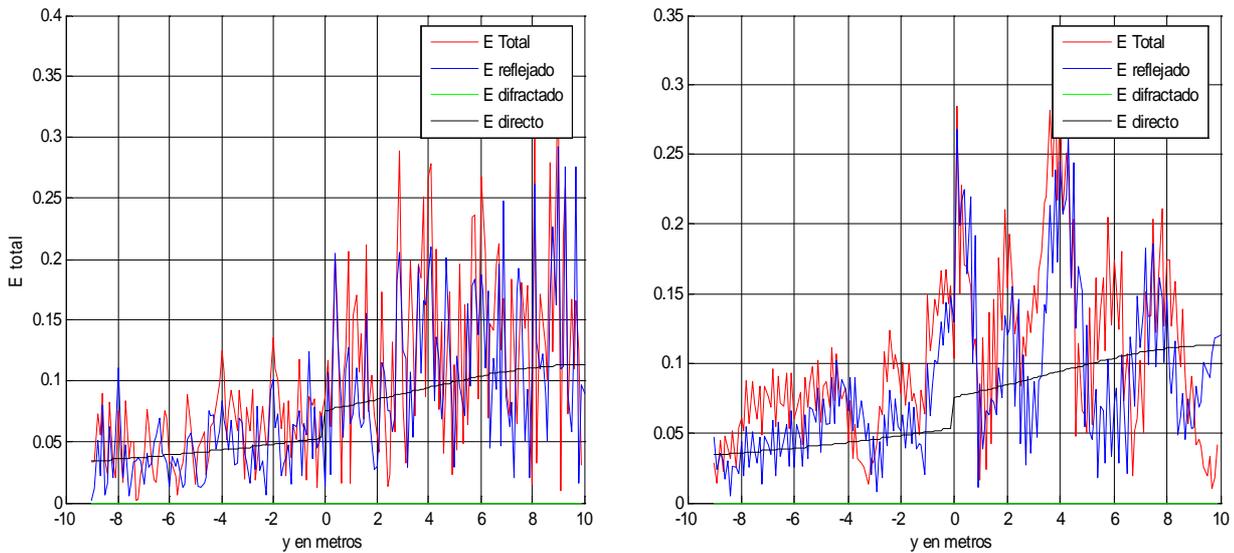


Figura 3.4. Comparativa del campo eléctrico recibido para frecuencias de 60 Ghz y 1 Ghz

Los resultados que se han obtenido coinciden con los resultados esperados. La atenuación de la onda aumenta conforme lo hace la frecuencia. Podemos observar que para 1 Ghz se recibe un campo eléctrico medio superior que para 60 Ghz.

Tiempo de simulación	47,3 segundos
Número de puntos empleados	20

Tabla 3.2. Características de la simulación

Una simulación más detallada consiste en representar un mapa de cobertura de las 4 habitaciones en el que pudiéramos ver la potencia recibida en cada punto. Con ello se conseguirá una visión más amplia del desvanecimiento sufrido en cada zona de la estructura.

Frecuencia	60 Ghz
Nº máximo de rayos reflejados	2
Nº máximo de rayos reflejados tras difracción	2

Tabla 3.3. Datos iniciales para la estructura de 4 habitaciones

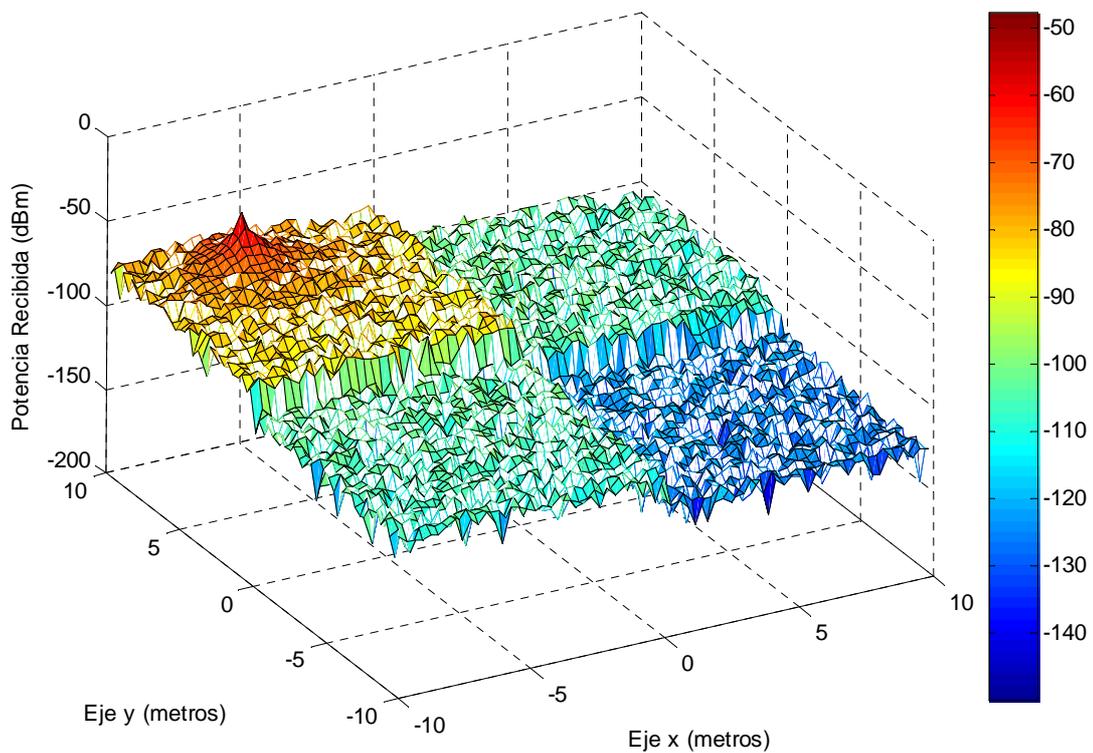


Figura 3.5. Representación de la Potencia recibida en las 4 habitaciones

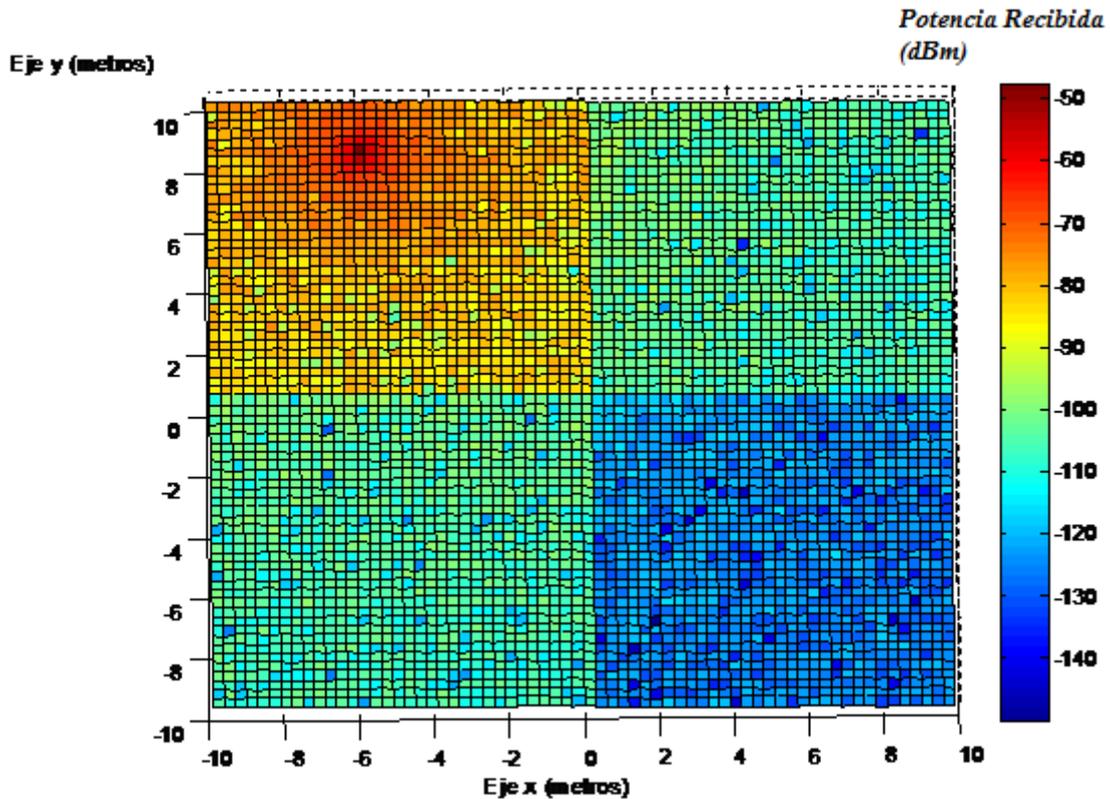


Figura 3.6. Representación en el eje X-Y de la Potencia recibida en las 4 habitaciones

Tiempo de simulación	1 hora 12 minutos
Número de puntos empleados	40000

Tabla 3.4. Características de la simulación

En este ejemplo que hemos mostrado para una estructura de 4 habitaciones se demuestra el gran efecto que tiene la atenuación de las paredes en las transmisiones móviles a 60 Ghz. En posteriores casos, estudiaremos paredes de distintas propiedades para mostrar las diferencias que existen según el material del que están compuestas.

Es destacable que el tiempo de simulación se haya incrementado tanto. Esto es debido al número elevado de puntos que hemos seleccionado. Si escogiéramos una menor cantidad sería más rápido, pero el grado de detalle del cálculo de la potencia en la habitación disminuiría.

El código empleado para representar la potencia recibida en toda la estructura es la siguiente:

```
E_grafica=[];E_grafica2=[];

[X,Y] = meshgrid(0.11:0.1:9.9, 0.11:0.1:9.9);

%%Empleamos un bucle para establecer los diferentes puntos del receptor
var1=0;
for y = [0.11:0.1:9.9]
    var1=var1+1;
    var2=0;
    for x = [0.11:0.1:9.9]
        var2=var2+1;

f=60e9;

tx=[0.1;0.1;2.2];
rx=[x;y;1.2];

Num_reflex=2;
dibujar=0;
polarizacion=0; %0 vertical(hard), 1 horizontal(soft)
epsilon_guarda=0.05*pi/180;keller=0;Atenuacion_limite=100;

define_planes_casaRennes

if dibujar,
    planes(:,1:4,:)=dibuja_paredes_rectangular(planes,tx,rx);
else
    ordena_puntos_pared;
end

[exteriores,aristas]=busca_aristas_solo(planes,tx,rx,dibujar);

[E_reflexion_total,E_reflexion,images_reflexion,phi_tx_reflexion,phi_rx_reflexion]=trazador3D(tx,rx,Num_reflex,...
    planes,f,dibujar,polarizacion,aristas,exteriores,Atenuacion_limite);

E_grafica(var1,var2)=E_reflexion_total;
```

```

if dibujar,
    planes(:,1:4,:)=dibuja_paredes_rectangular(planes,tx,rx);%%metodo que ordena los puntos y dibuja las
paredes rectangulares
end

Num_reflex=2;

[E_difr_total,E_difr_dir,E_difr_dir_total,E_difr_reflexiones_punto_difraccion,E_difr_reflexiones_total,imag
es_difr,...
    phi_difr_directa_tx,phi_difr_directa_rx,phi_tx_difr_reflexion,phi_rx_difr_reflexion,...
    E_difr_ext_total,E_difr_ext_dir,E_difr_ext_dir_total,E_difr_ext_reflexiones_punto_difraccion,...
    E_difr_ext_reflexiones_total,images_difr_ext,phi_difr_ext_directa_tx,phi_difr_ext_directa_rx,...

phi_tx_difr_ext_reflexion,phi_rx_difr_ext_reflexion]=trazador3D_difract(tx,rx,Num_reflex,planes,f,dibujar,.
..
    polarizacion,aristas,exteriores,epsilon_guarda,keller,Atenuacion_limite);

E_grafica1(var1,var2)=E_reflexion_total+E_difr_total;
end
end

%%Representación gráfica

hold on
grid on
figure(2)
mesh(X,Y,20*log10((abs(E_grafica1)*3e8)/(f*4*pi)))
xlabel('Eje x (metros)');
ylabel('Eje y (metros)');
zlabel('Potencia Recibida (dBm)');
hold off

```

Las funciones principales que se emplean son trazador3D.m y trazador3D_difract.m. La primera obtiene el valor de la intensidad del campo eléctrico de los rayos que se reflejan en las diferentes paredes y que llegan al receptor. Para ello emplea un algoritmo que implementa la Teoría de imágenes.

La segunda función es similar a la anterior con la salvedad que ahora los rayos reflejados que llegan previamente se han difractado en alguna esquina.

3.1.2. Estructura con corredor

A continuación llevaremos a cabo una simulación en un entorno real. El estudio se realizará sobre un corredor, y compararemos los resultados con un artículo publicado en 2009 por Suiyan Geng and Pertti Vainikainen en la Universidad tecnológica de Helsinki [20]. La estructura del corredor la podemos observar en la siguiente figura:

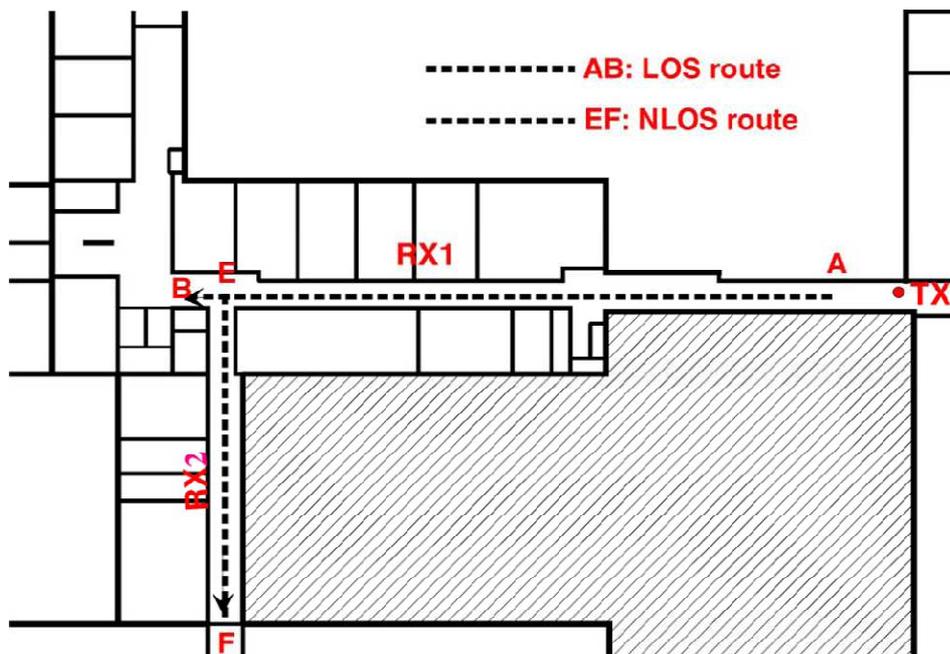


Figura 3.7. Estructura del corredor estudiado

El transmisor se colocará al final de un pasillo de 60 metros de longitud, mientras que el receptor se moverá a lo largo de una ruta de visión directa (A-B, 52 m) y otra de Visión no directa (E-F, 25 m). Utilizaremos una antena en el transmisor de 22,7 dB de ganancia y en el receptor una de 5 dB. Ambas antenas estarán colocadas a una altura de 1,25 metros. [20] Asumiremos también una potencia inicial de 1 Watio.

Para el techo utilizaremos madera con una permitividad relativa de 7,6 y una conductividad muy baja, para las paredes emplearemos ladrillo de permitividad relativa 4,1 – $j0,15$ y conductividad 0,0364. Finalmente el suelo será de cemento con las propiedades indicadas en la Tabla 2.1. Será muy importante el efecto de la atenuación de las paredes en el resultado final.

Gráficamente la estructura empleada en Matlab para simular este corredor será:

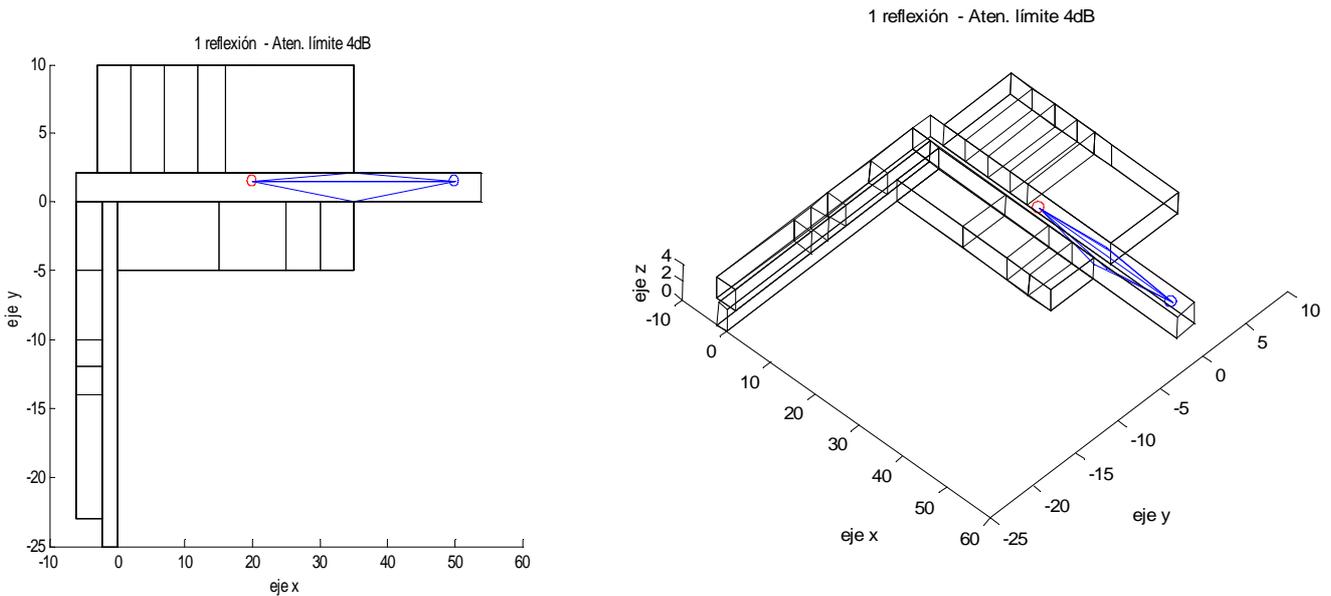
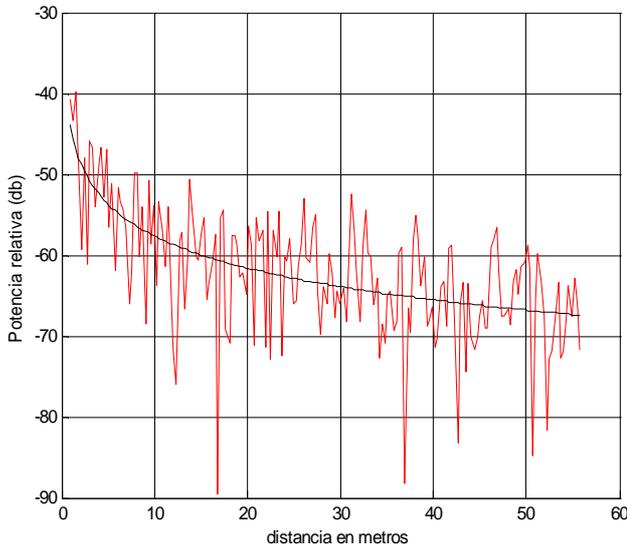


Figura 3.8. Estructura desarrollada en Matlab para el estudio del corredor

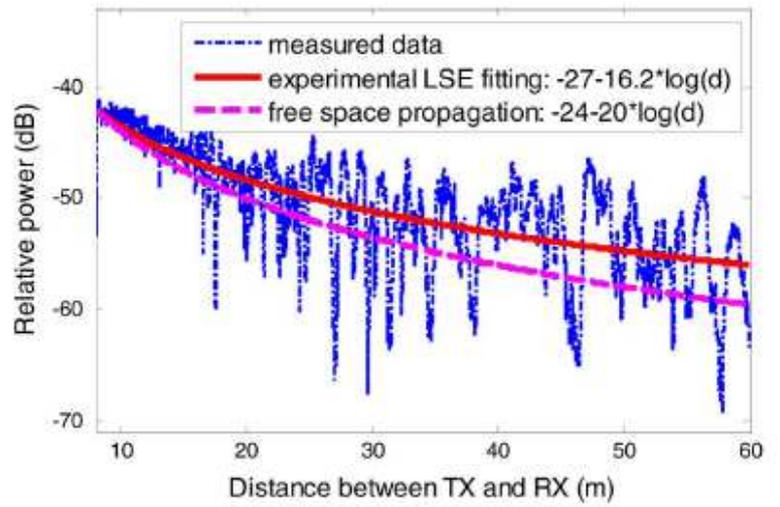
Frecuencia	60 Ghz
Nº máximo de rayos reflejados	2
Nº máximo de rayos reflejados tras difracción	2

Tabla 3.5. Datos iniciales para la simulación de la estructura ‘Corredor’

En primer lugar realizaremos la simulación de un recorrido del receptor desde el punto A al B, una trayectoria de visión directa. Los resultados los compararemos con los obtenidos por el artículo. [20]



[A]



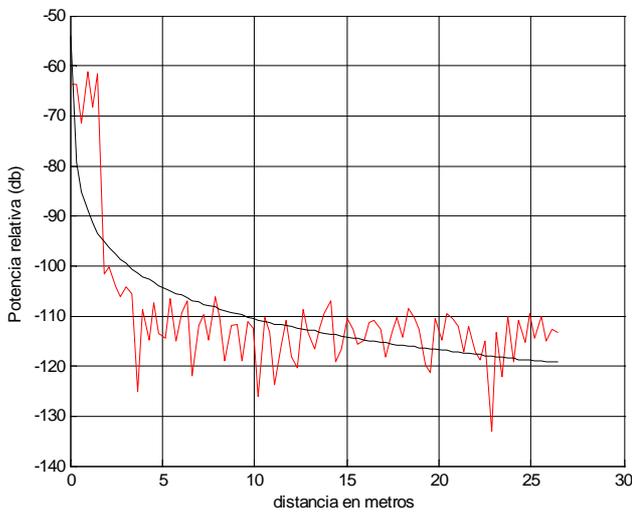
[B]

Figura 3.9. Potencia recibida en la ruta de Visión Directa obtenida por nuestro simulador [A] y la obtenida por el artículo [B]

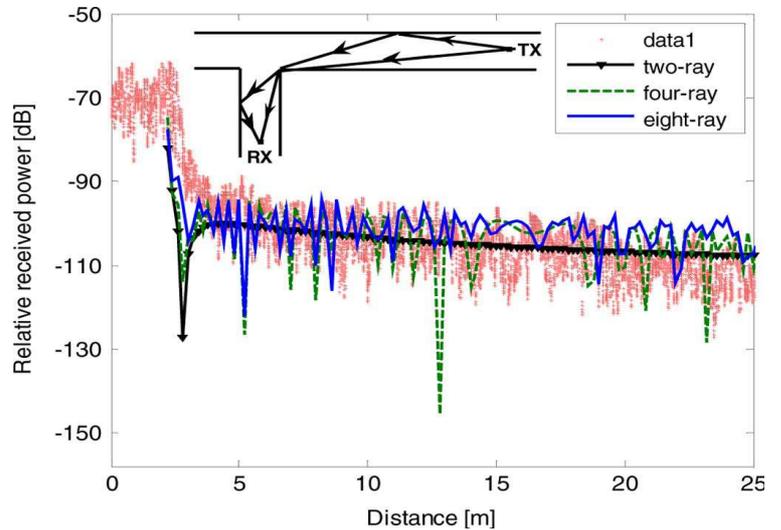
Tiempo de simulación	4 minutos 37 segundos
Número de puntos empleados	520

Tabla 3.6. Características de la simulación

Para la ruta E-F de Visión no directa obtenemos:



[A]



[B]

Figura 3.10. Potencia recibida en la ruta de Visión No Directa obtenida por nuestro simulador [A] y la obtenida por el artículo [B]

Tiempo de simulación	2 minutos 3 segundos
Número de puntos empleados	270

Tabla 3.7. Características de la simulación

Como podemos observar, los resultados son similares a los del artículo. La curva de ajuste por mínimos cuadrados y la de los resultados del artículo son similares. Las pequeñas diferencias observadas son debidas a que no disponemos de los datos necesarios para simular fielmente la estructura. Aun así, habría que establecer los valores exactos de la atenuación de las paredes y construir una estructura más precisa.

Vamos ahora, a realizar la misma simulación pero aumentando el número máximo de reflexiones a 5.

Frecuencia	60 Ghz
Nº máximo de rayos reflejados	5
Nº máximo de rayos reflejados tras difracción	5

Tabla 3.8. Datos iniciales para la simulación de la estructura ‘Corredor’

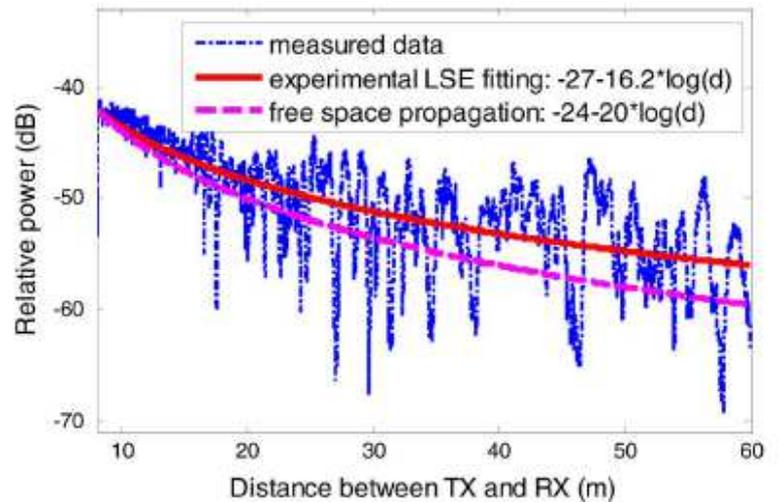
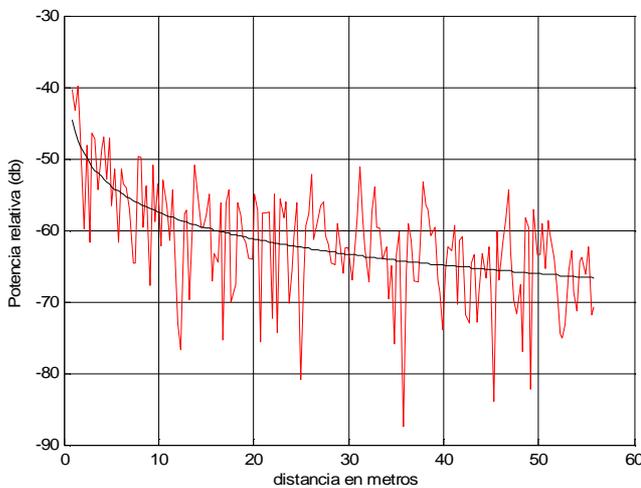


Figura 3.11. Potencia recibida en la ruta de Visión Directa obtenida por nuestro simulador [A] y la obtenida por el artículo [B] con 5 reflexiones como máximo por rayo

Tiempo de simulación	21 minutos 33 segundos
Número de puntos empleados	5200

Tabla 3.9. Características de la simulación

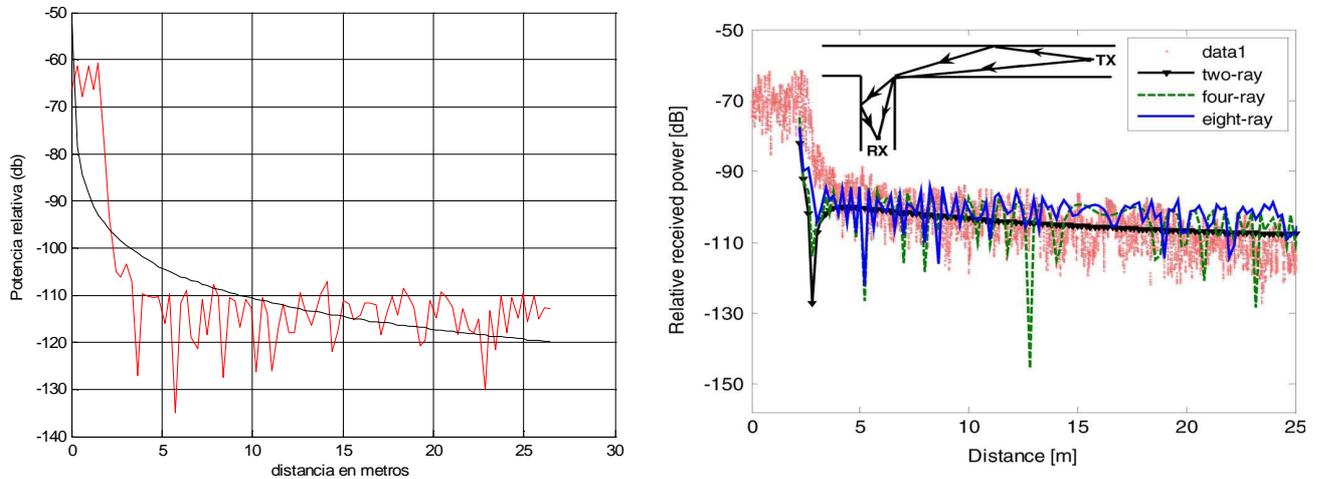


Figura 3.12. Potencia recibida en la ruta de Visión No Directa obtenida por nuestro simulador [A] y la obtenida por el artículo [B] con 5 reflexiones como máximo por rayo

Tiempo de simulación	14 minutos 41 segundos
Número de puntos empleados	270

Tabla 3.10. Características de la simulación

Se observa que los resultados obtenidos para las simulaciones que empleamos como máximo 2 reflexiones por rayo y las que utilizamos 5, son prácticamente idénticos. Sin embargo, el tiempo de cómputo empleado crece de forma muy brusca. Se deduce de estos datos que hay que encontrar un compromiso entre número de reflexiones empleadas y tiempo de simulación.

3.1.3. Estructura de una casa típica de una planta [15]

A continuación se analizarán las simulaciones realizadas en una estructura más compleja. Con ello conseguiremos observar un caso más real, en donde diversos materiales influyen y las diferencias entre visión directa y visión no directa se hace bastante palpable.

El objetivo de esta simulación es comparar la eficiencia de nuestro simulador en un entorno más real y compararlo con las simulaciones llevadas a cabo en [15]. En este artículo se utiliza un lanzador de rayos, empleando una separación de angular de 1° entre cada rayo.

La estructura empleada se basa en una casa residencial real situada en la población francesa de Rennes. En ella se emplean materiales como ladrillo, cemento, azulejos, etc para las paredes, madera para el suelo y paredes, etc. Hay ventanas muy grandes y una chimenea. Para nuestra simulación no tendremos en cuenta los elementos decorativos por la alta complejidad que añadiría. Por ello consideraremos una casa vacía.

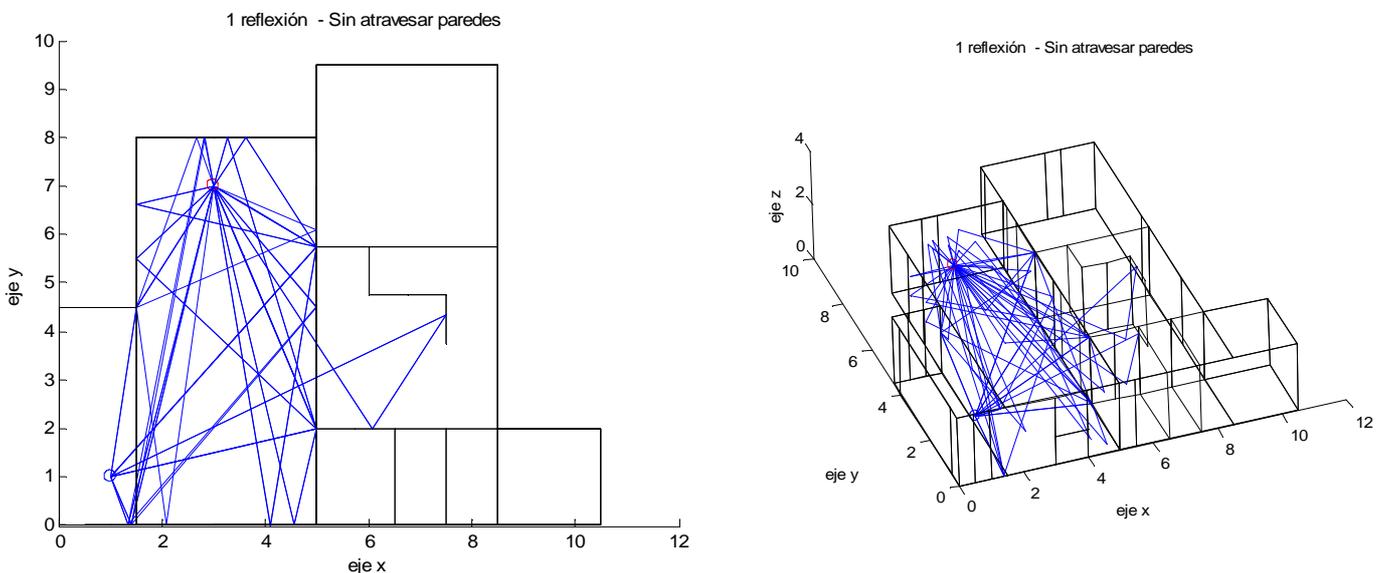


Figura 3.13. Plano 2D y 3D de la Casa de Rennes

Como podemos observar las dimensiones de esta vivienda son de 10.5x9.5x2.5m. Supondremos que el transmisor se coloca en la esquina de la habitación principal a una altura de 2.20 metros (0,1,0,1,2.20).

Se obtendrá un mapa de la cobertura en la casa, donde se podrá contemplar en cada habitación cómo varía la potencia recibida en función de la posición del receptor con respecto al transmisor.

Frecuencia	60 Ghz
Nº máximo de rayos reflejados	2
Nº máximo de rayos reflejados tras difracción	1

Tabla 3.11. Datos iniciales para la simulación de la casa de Rennes

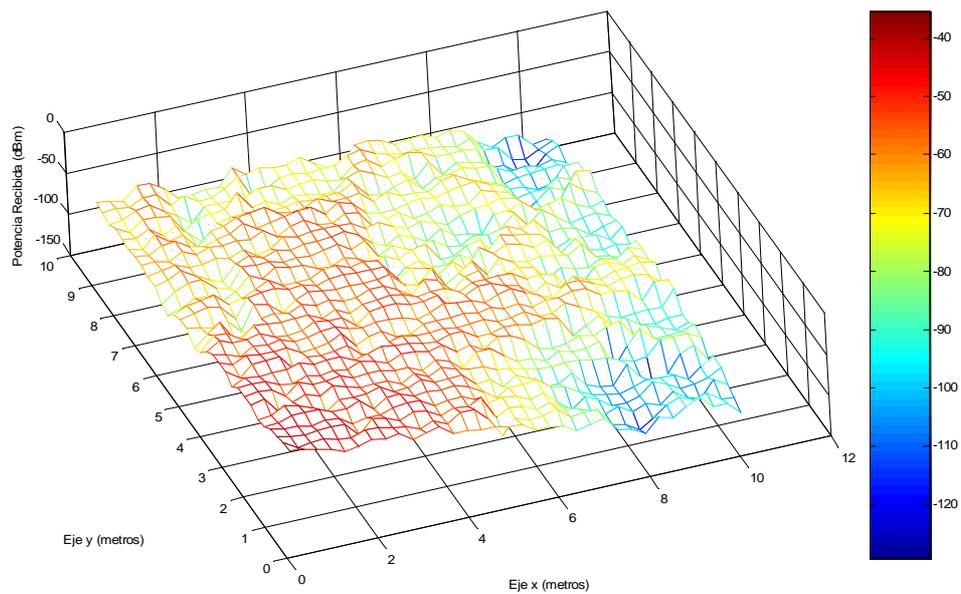


Figura 3.14. Representación 3D de la potencia recibida en la casa de Rennes

Una mejor representación gráfica de la simulación sería la siguiente:

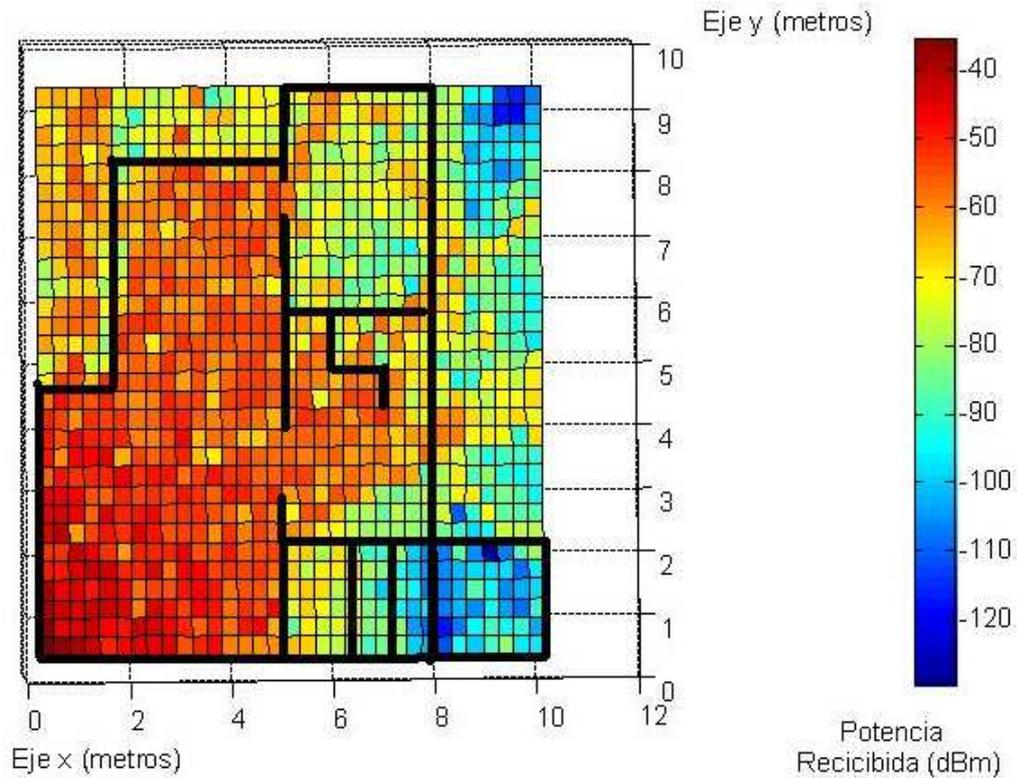


Figura 3.15. Representación 2D de la potencia recibida en la casa de Rennes

Tiempo de simulación	3 horas 17 minutos
Número de puntos empleados	1120

Tabla 3.12. Características de la simulación

Analizando en primer lugar los datos finales del tiempo de simulación obtenido se pone de manifiesto el gran inconveniente de la herramienta que estamos empleando, que es el alto coste computacional. A pesar de que el número de puntos empleados no es tan elevado como en otras simulaciones, el tiempo se ha incrementado de forma considerable. Esto es debido a que la geometría empleada en el desarrollo de la vivienda es altamente compleja. Se han creado muchas paredes de distintos materiales lo que implica que el número de reflexiones que se producen aumenta en un porcentaje muy elevado.

Si incrementamos el número de puntos o el máximo de reflexiones por rayo, el tiempo de cálculo puede llegar a sobrepasar las 40 horas de simulación en el ordenador empleado.

Una de las principales conclusiones que se puede sacar de la Figura 3.15 es la alta atenuación que introducen las paredes y puertas para frecuencias de 60 Ghz. El hecho de que una puerta esté abierta o cerrada tiene un gran impacto en la propagación. También podemos observar como la transmisión a través de los cristales sufre una menor atenuación que a través de otros materiales.

Finalmente si comparamos los resultados obtenidos con los del artículo [15], se observa que a grandes rasgos existe cierta similitud entre ambas soluciones. Esto nos lleva a reafirmar la gran utilidad que tiene la herramienta Trazador 3D para realizar análisis y estudios de sistemas de comunicaciones móviles a 60 Ghz en entornos indoor.

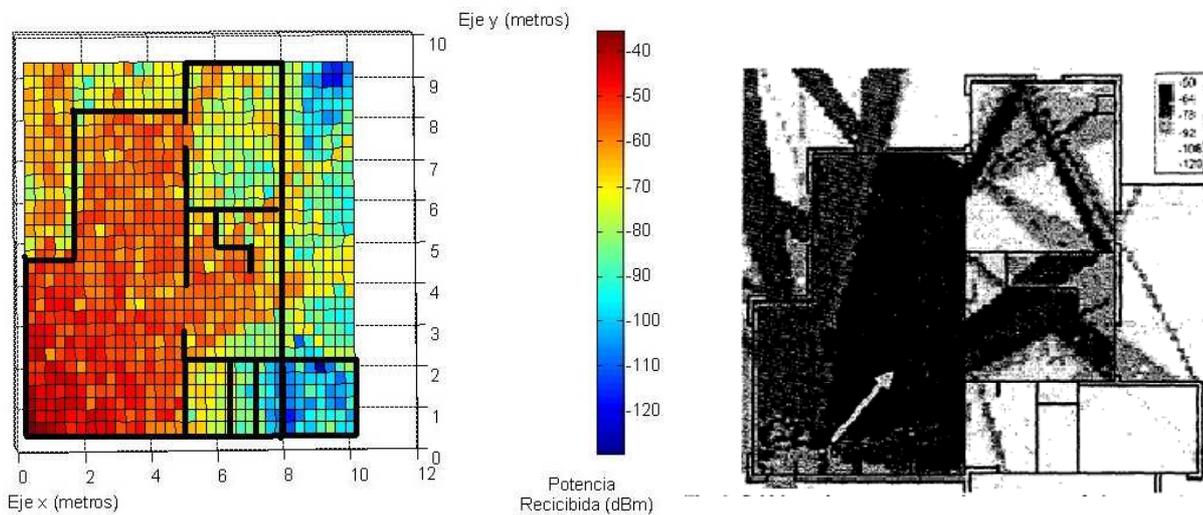


Figura 3.16. Comparación de los resultados obtenidos con el Trazador con los del artículo [15]

3.2. Comparación de resultados entre Trazador y Lanzador

En este apartado pasaremos a realizar comparaciones entre las simulaciones obtenidas por el Trazador y el Lanzador. Así sabremos cuál de ellas es más exacta.

3.2.1. Estructura de 4 habitaciones

Se empleará nuevamente la estructura de 4 habitaciones con la que se observarán fácilmente las diferencias existentes entre los dos simuladores. En primer lugar analizaremos los contrastes presentados para cada caso utilizando diversas frecuencias. Para estas simulaciones utilizaremos un número máximo de reflexiones en el trazador de 2 y todas las paredes estarán formadas de cemento. A su vez en el lanzador serán 10000 los rayos lanzados por el transmisor y se utilizará un coeficiente de transmisión que atenúa la onda en un orden de magnitud, es decir, en 10 dB. El caso inicial será el de 60 Ghz, frecuencia que constituye el eje principal de estudio de este proyecto:

- *60 Ghz*

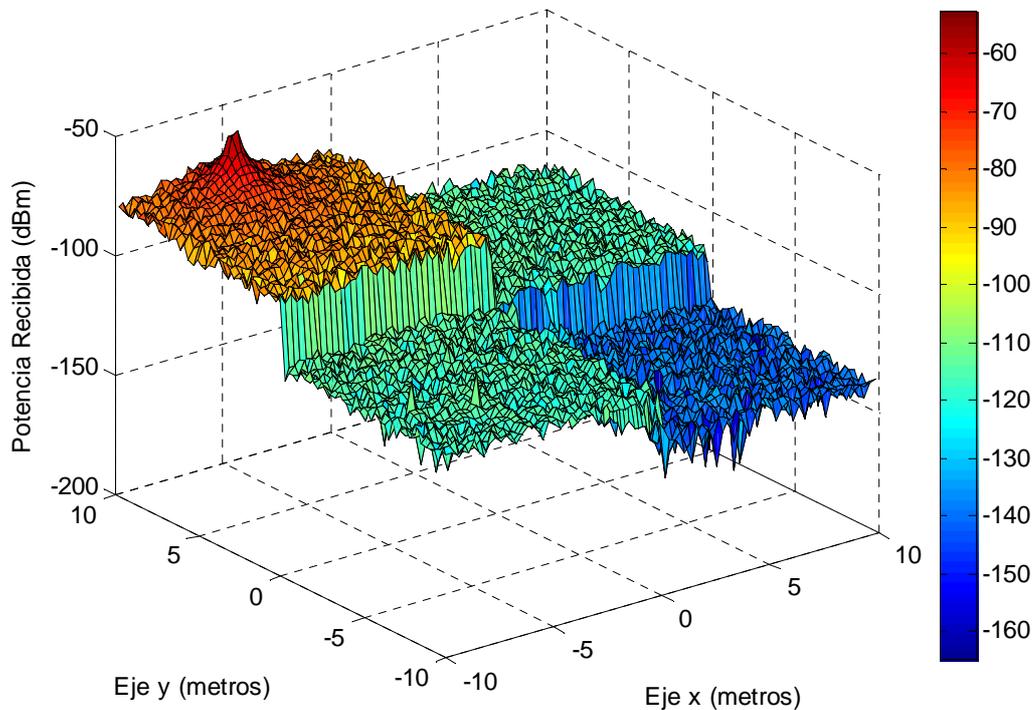


Figura 3.17. Representación 3D de la potencia recibida con el Lanzador a 60 Ghz

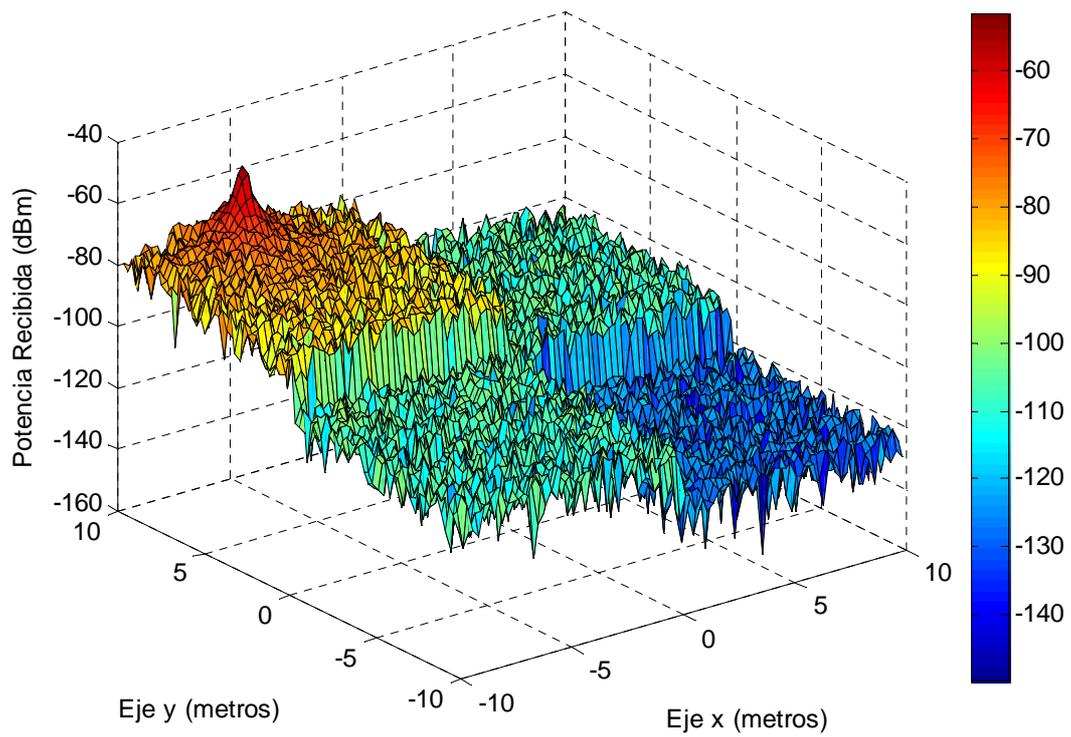


Figura 3.18. Representación 3D de la potencia recibida con el Trazador a 60 Ghz

- 1 Ghz:

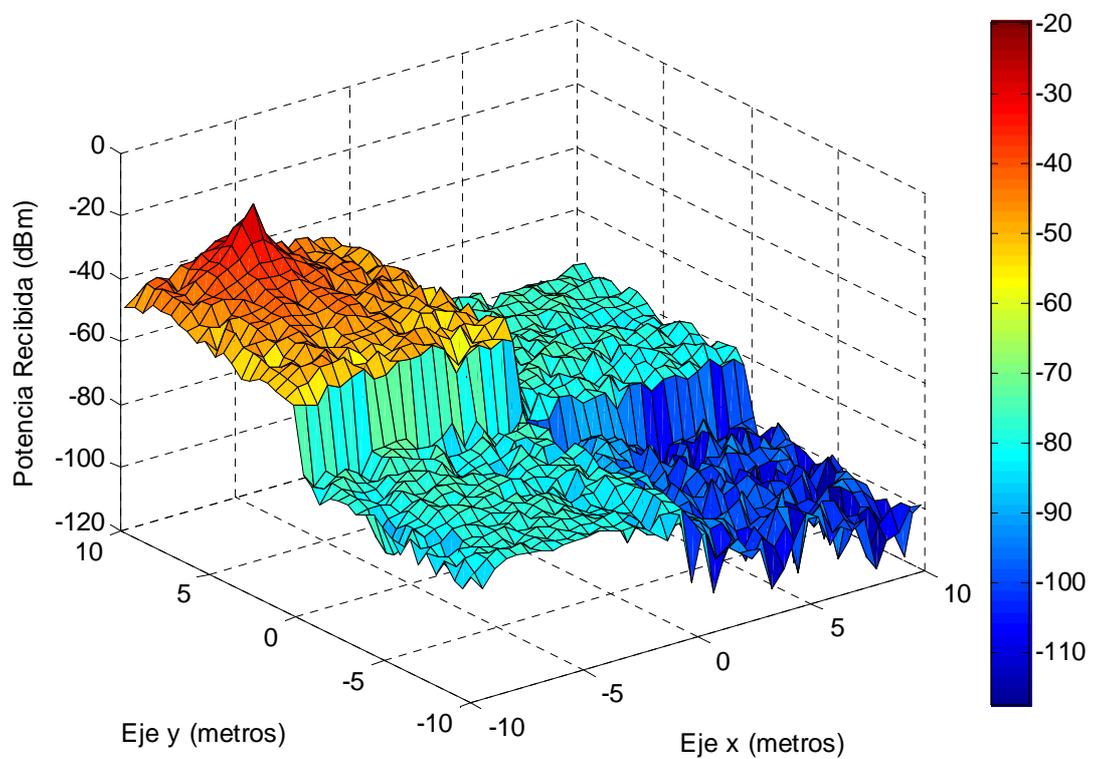


Figura 3.19. Representación 3D de la potencia recibida con el Lanzador a 1 Ghz

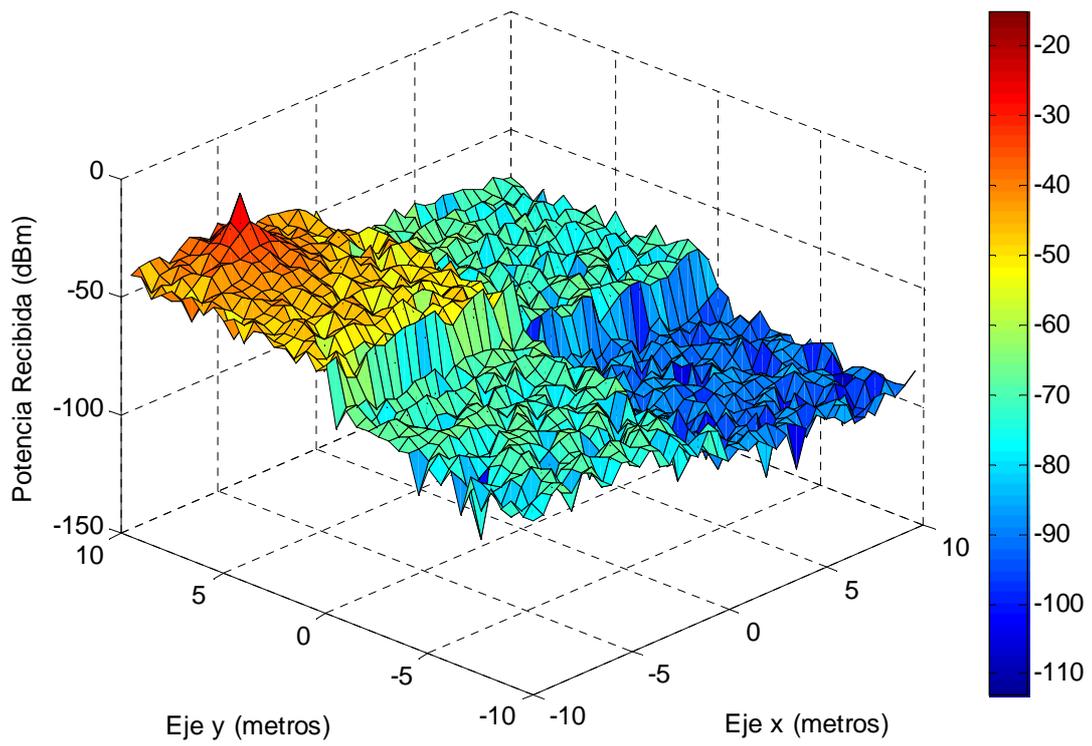


Figura 3.20. Representación 3D de la potencia recibida con el Trazador a 1 Ghz

- 10 Ghz:

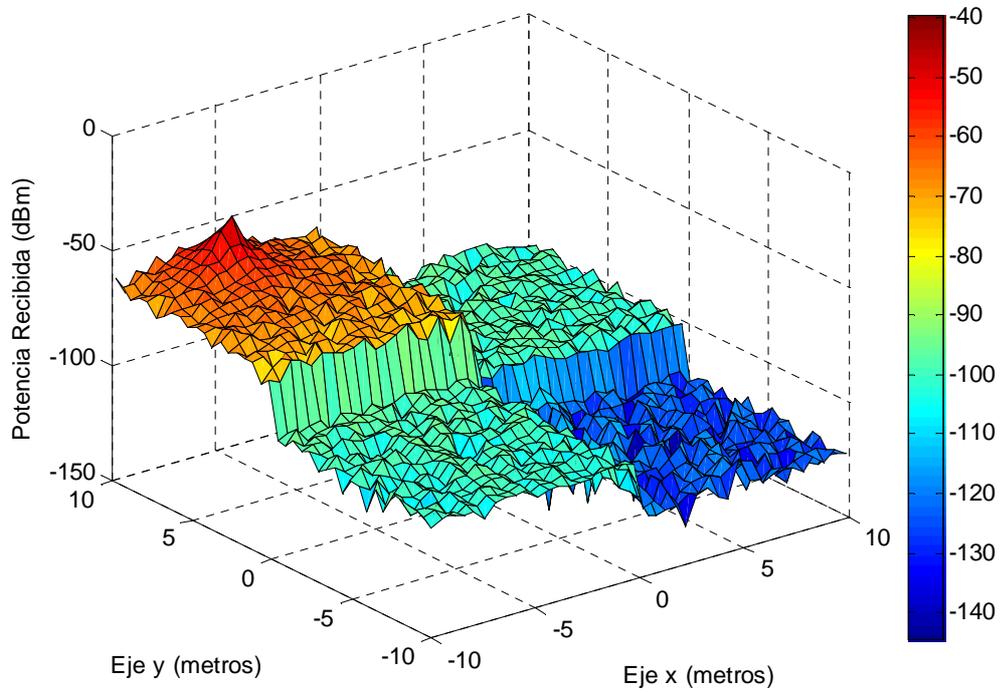


Figura 3.21. Representación 3D de la potencia recibida con el Lanzador a 10 Ghz

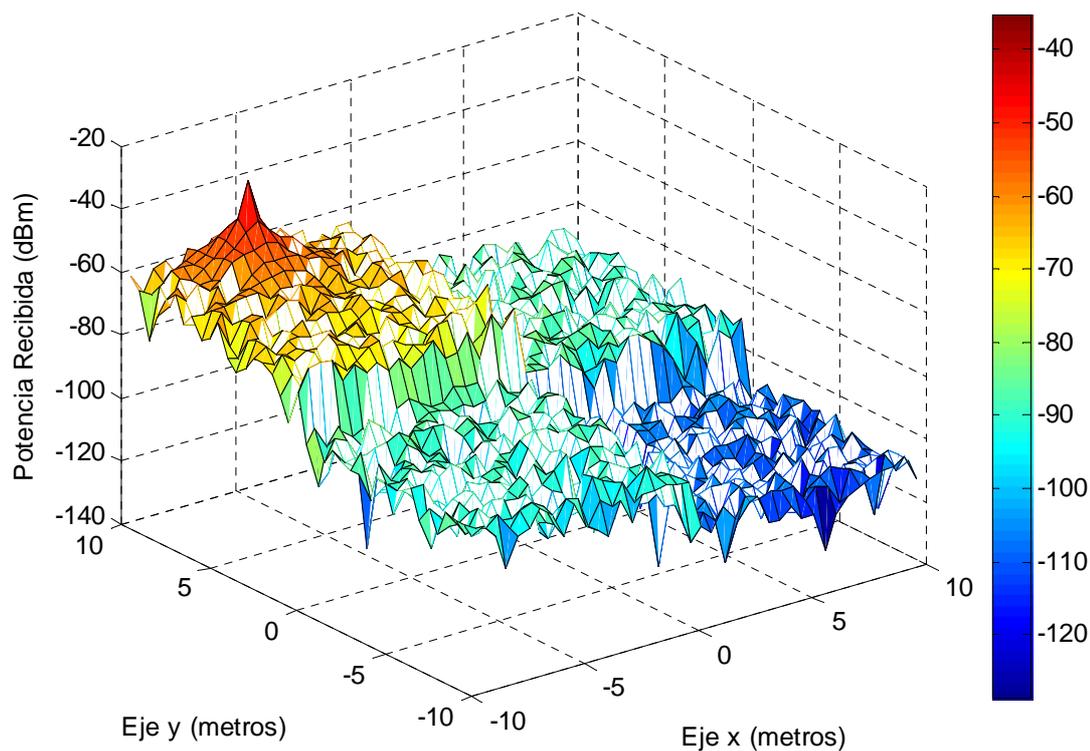


Figura 3.22. Representación 3D de la potencia recibida con el Trazador a 10 Ghz

- 30 Ghz:

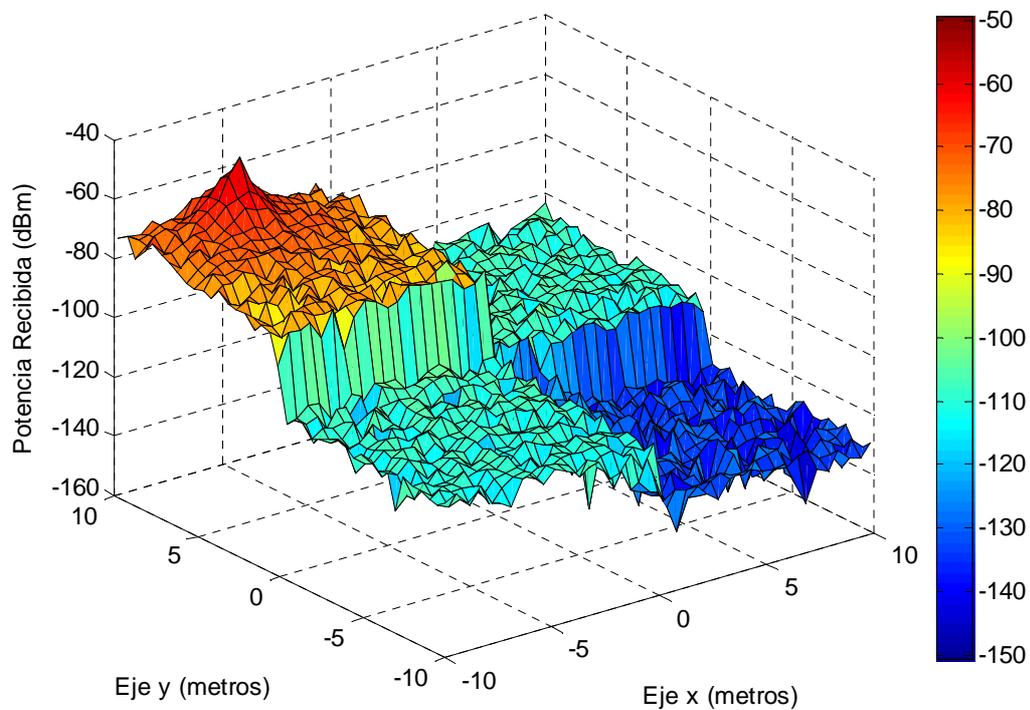


Figura 3.23. Representación 3D de la potencia recibida con el Lanzador a 30 Ghz

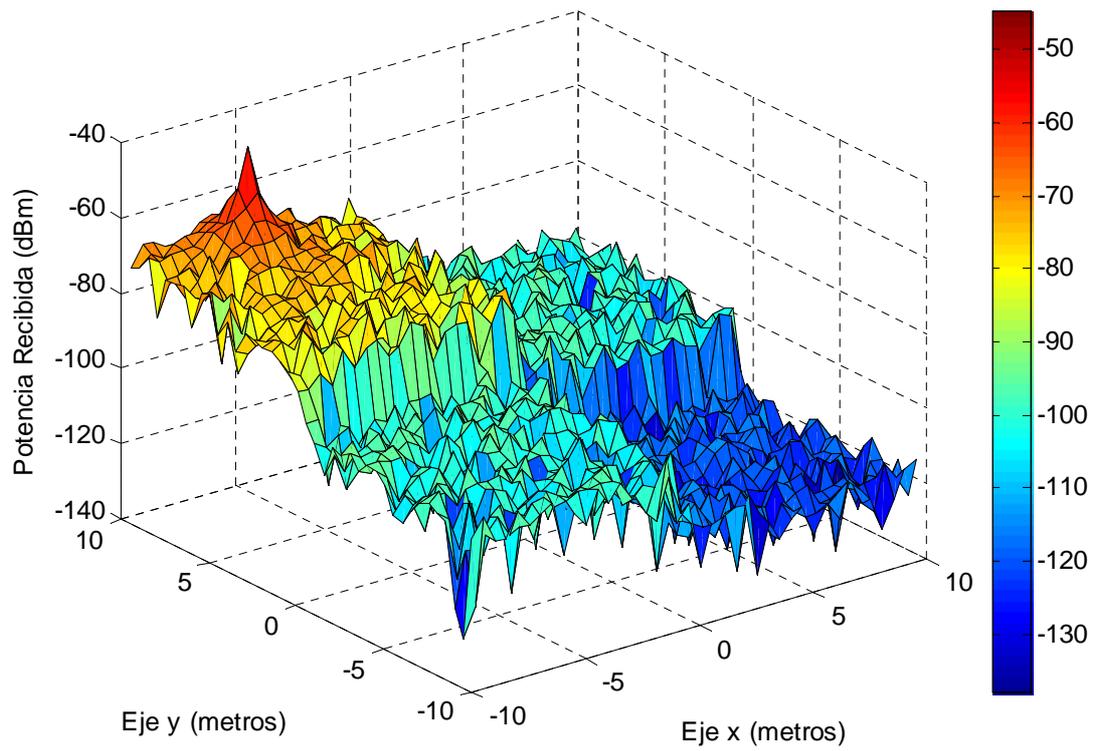


Figura 3.24. Representación 3D de la potencia recibida con el Trazador a 30 Ghz

- 90 Ghz:

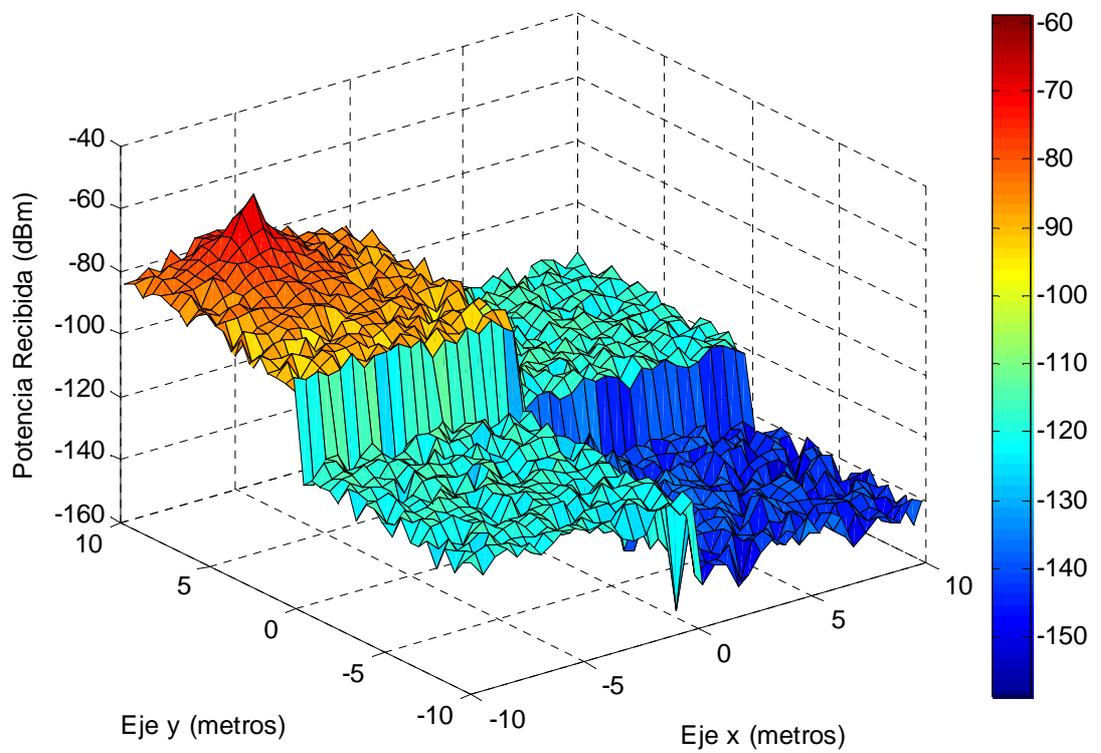


Figura 3.25. Representación 3D de la potencia recibida con el Lanzador a 90 Ghz

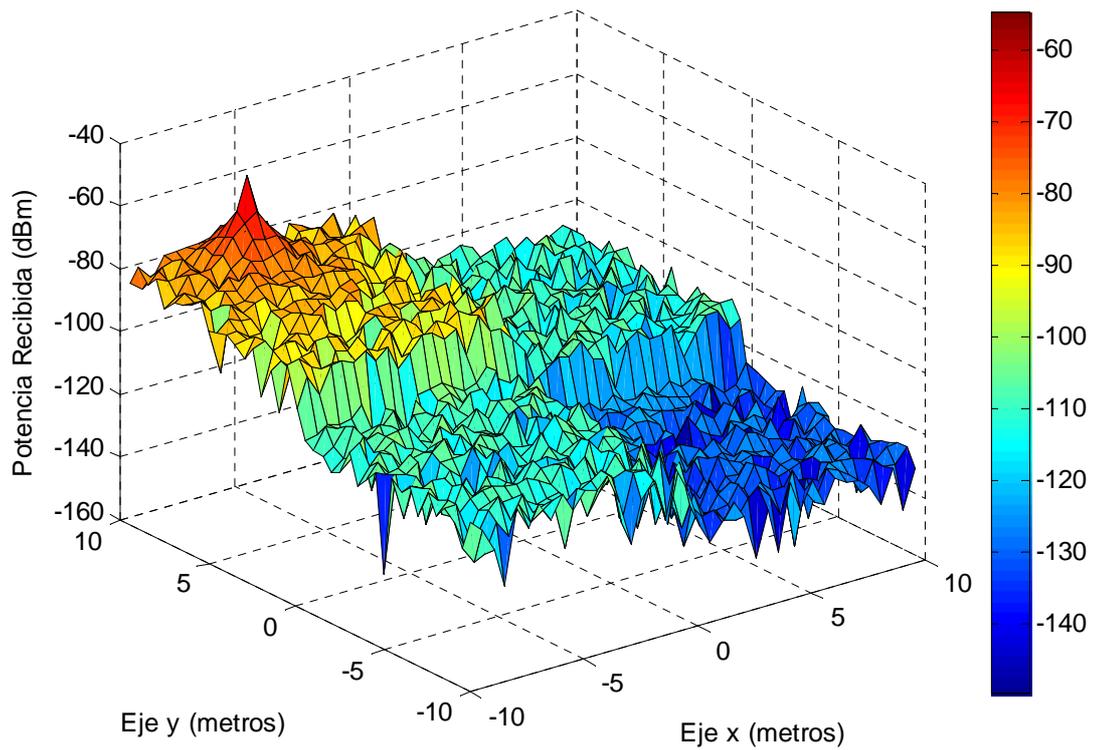


Figura 3.26. Representación 3D de la potencia recibida con el Trazador a 90 Ghz

A simple vista es difícil observar la gran similitud que hay entre los dos simuladores. Principalmente debido a que la estructura no es muy compleja y empleamos un único material. Profundizaremos más en este apartado, calculando la diferencia entre los datos obtenidos por las dos herramientas para ver de forma más numérica el grado de semejanza entre ambas.

Obteniendo la diferencia entre los resultados de cada herramienta a 60 Ghz podemos observar:

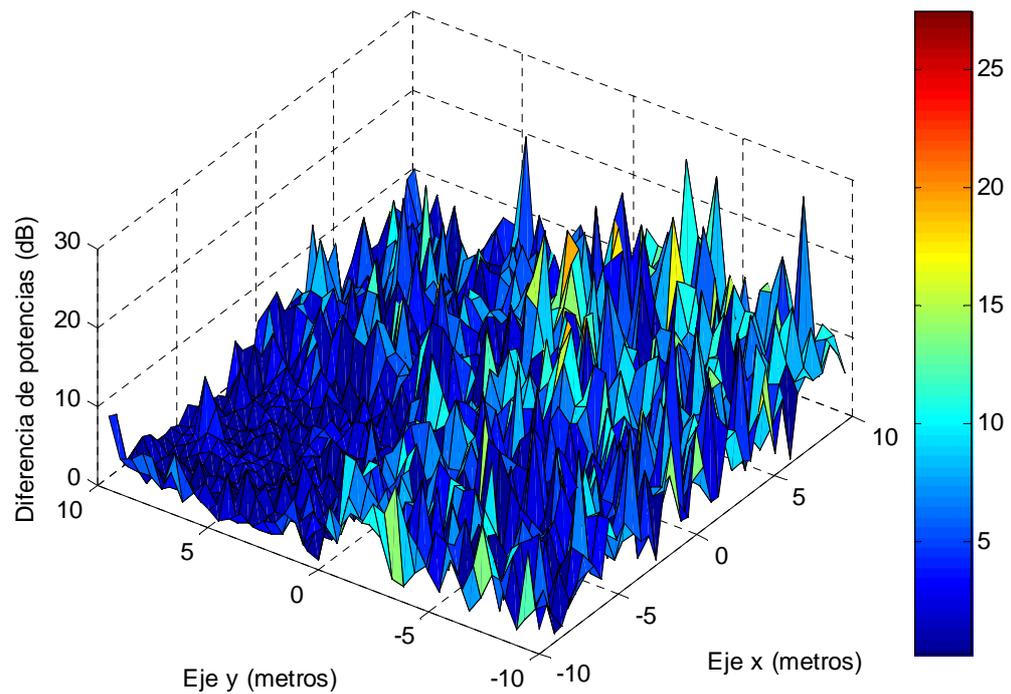


Figura 3.27. Representación 3D de la diferencia en valor absoluto entre los resultados de los dos simuladores a 60 Ghz.

Podemos observar que para la habitación donde se encuentra el transmisor, la diferencia es apreciable. Tal como se ve en la Tabla 3.13 las pérdidas en dicha habitación son de una media de 3.11 dB. Para el resto de habitaciones los métodos difieren todavía en mayor medida. Obteniéndose mayores pérdidas con el Trazador 3D. Se producen diferencias de potencia entre ambos simuladores de **9,512 dB** en este caso. Esto es debido tal como mencionábamos anteriormente a que en el lanzador no se tienen en cuenta las reflexiones en la parte inferior y superior de las estructuras.

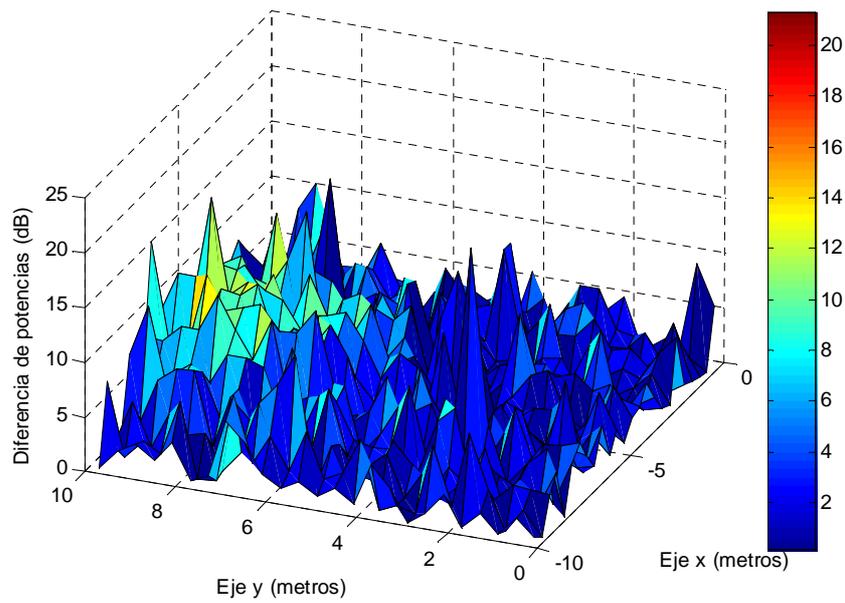


Figura 3.28. Representación 3D de la diferencia en valor absoluto entre los resultados de los dos simuladores a 60 Ghz en la habitación del transmisor

Centrándonos en la habitación en la que se encuentra situado el transmisor, procedemos a calcular el valor medio de la diferencia entre las potencias recibidas por el trazador y el lanzador. También hallaremos la varianza:

Media de la diferencia entre las potencias recibidas	3.1173 dB
Varianza de la diferencia entre las potencias recibidas	15.2176 dB

Tabla 3.13. Media y varianza de la diferencia a 60 Ghz

Realizaremos el mismo procedimiento para distintas frecuencias:

- **1 Ghz:**

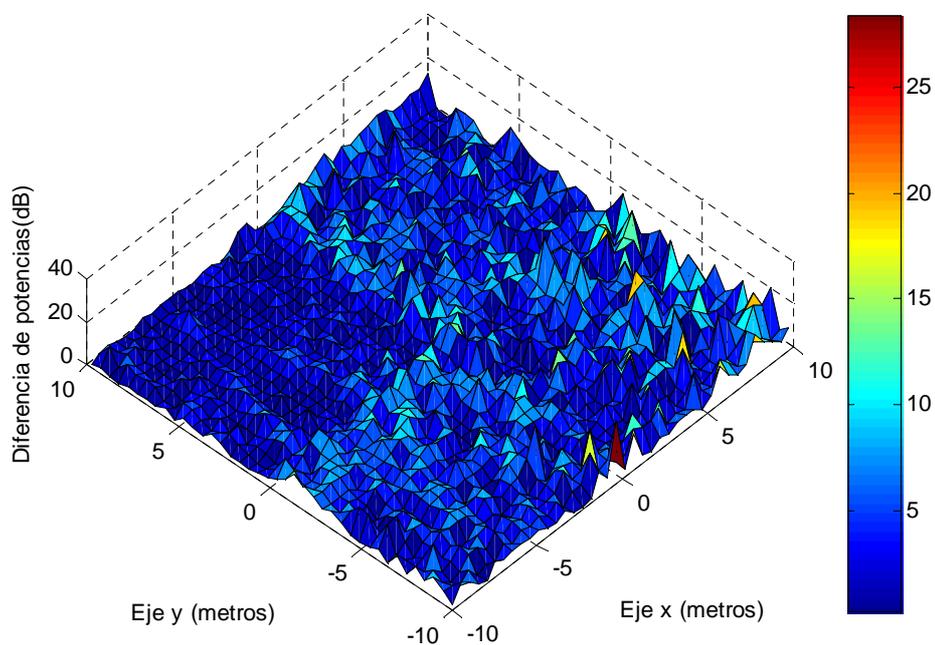


Figura 3.29. Representación 3D de la diferencia entre los resultados de los dos simuladores a 1 Gh

Media de la diferencia de potencias –habitación transmisor-	3.8762 dB
Varianza de la diferencia entre las potencias recibidas	55.2641 dB
Media de la diferencia de potencias –4 habitaciones-	9.6144 dB

Tabla 3.14. Media y varianza de la diferencia a 1 Ghz

- **10 Ghz:**

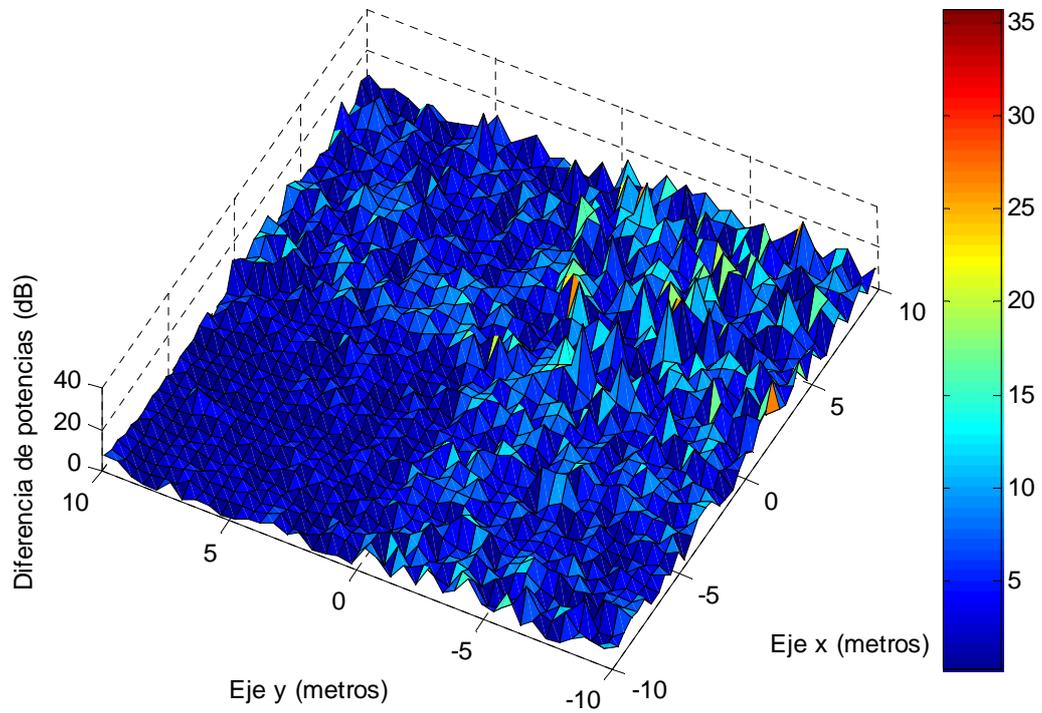


Figura 3.30. Representación 3D de la diferencia entre los resultados de los dos simuladores a 10 Ghz

Media de la diferencia de potencias –habitación transmisor-	3.1777 dB
Varianza de la diferencia entre las potencias recibidas	30.2115 dB
Media de la diferencia de potencias –4 habitaciones-	10.112 dB

Tabla 3.15. Media y varianza de la diferencia a 10 Ghz

- **90 Ghz:**

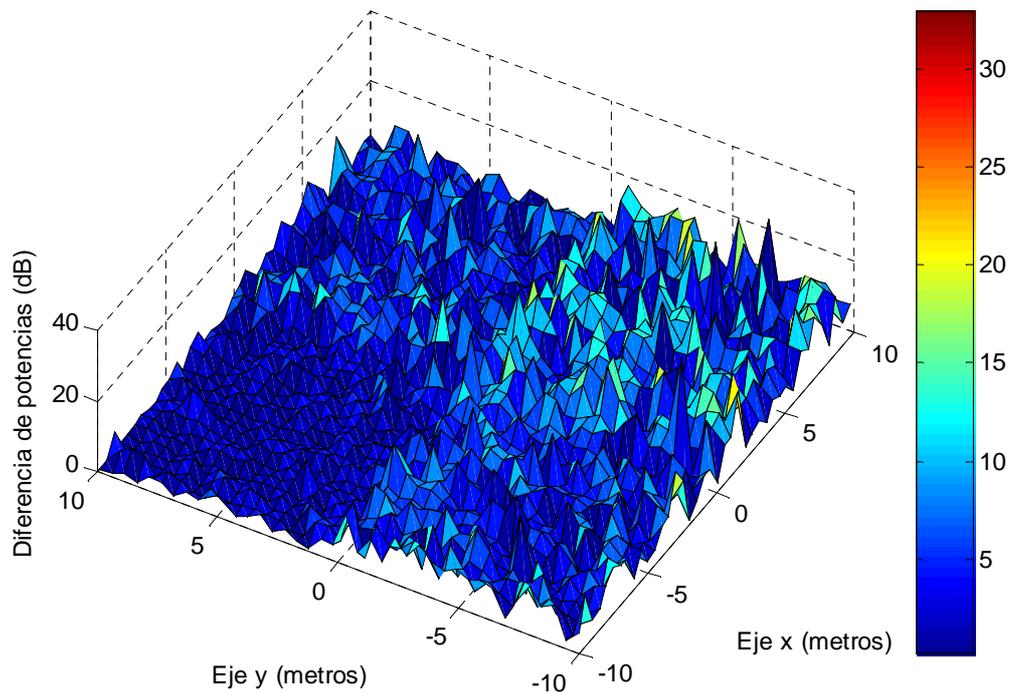


Figura 3.31. Representación 3D de la diferencia entre los resultados de los dos simuladores a 90 Ghz

Media de la diferencia de potencias –habitación transmisor-	3.1483 dB
Varianza de la diferencia entre las potencias recibidas	60.116 dB
Media de la diferencia de potencias -4 habitaciones-	11.629 dB

Tabla 3.16. Media y varianza de la diferencia a 90 Ghz

La media de las diferencias entre los resultados obtenidos por las dos herramientas en la misma habitación donde se encuentra el transmisor rondan los 3 dBs. Dicho parámetro lo hemos obtenido a partir del valor absoluto de la diferencia, por lo que se puede calificar como prácticamente similares ambos simuladores en estructuras poco complejas. Sin embargo, para estructuras como la que mostraremos a continuación el Trazador 3D es mucho más preciso debido a la gran complejidad de la estructura.

3.2.2. Estructura de una casa típica de una planta

Como explicábamos anteriormente, en este apartado realizaremos una simulación a 60 Ghz con las dos herramientas nuevamente. Pero en esta ocasión, la estructura será una casa típica de una planta. Observaremos que los resultados tienen pérdidas apreciables teniendo en cuenta que para el trazador 3D se tienen en cuenta tanto los rayos que se reflejan en el techo y suelo como que las paredes están formadas por distintos materiales. Para el lanzador obtenemos:

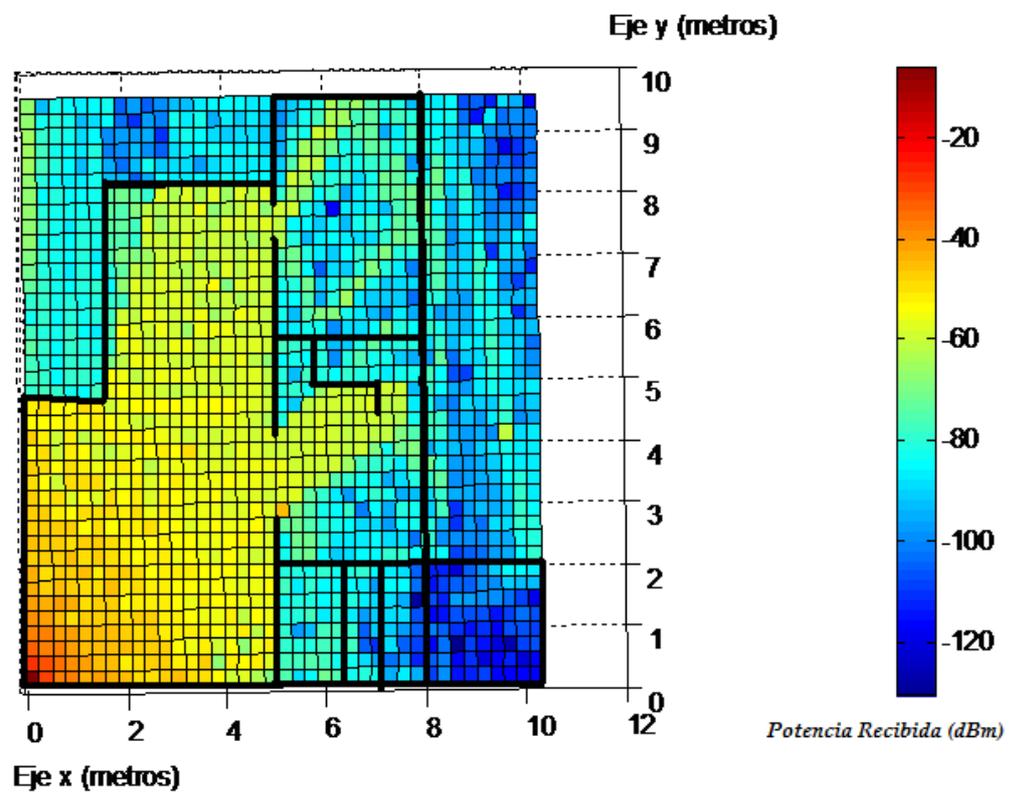


Figura 3.32. Representación de la potencia recibida a 60 Ghz para el Lanzador

Comparándolo con el trazador y los resultados del artículo [15]:

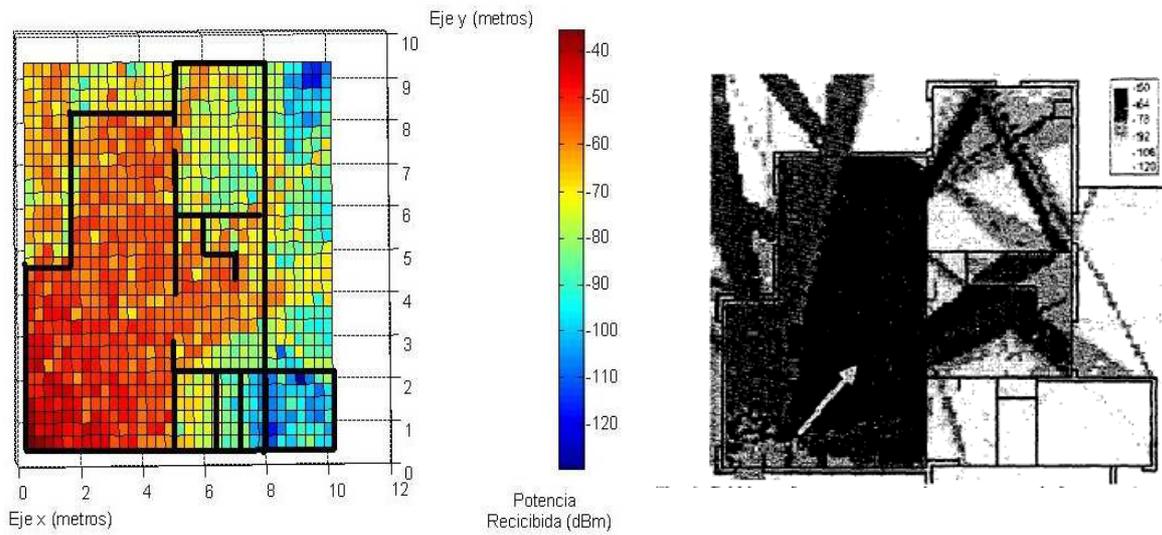


Figura 3.33. Representación de la potencia recibida a 60 Ghz para el Trazador 3D y los resultados del artículo [15]

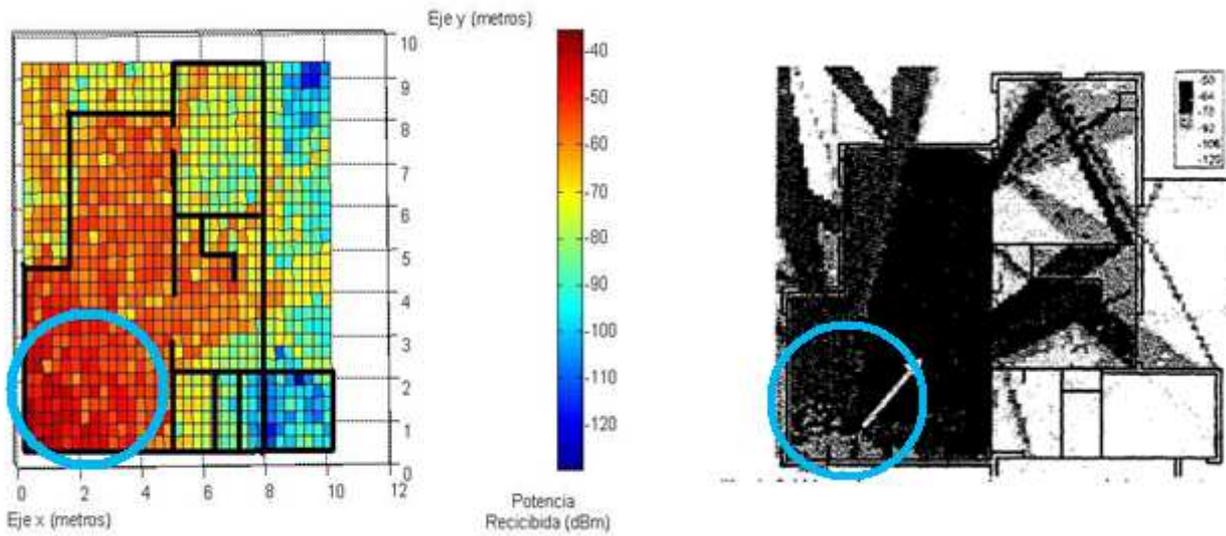


Figura 3.34. Representación de la potencia recibida a 60 Ghz para el Trazador 3D y los resultados del artículo [15]

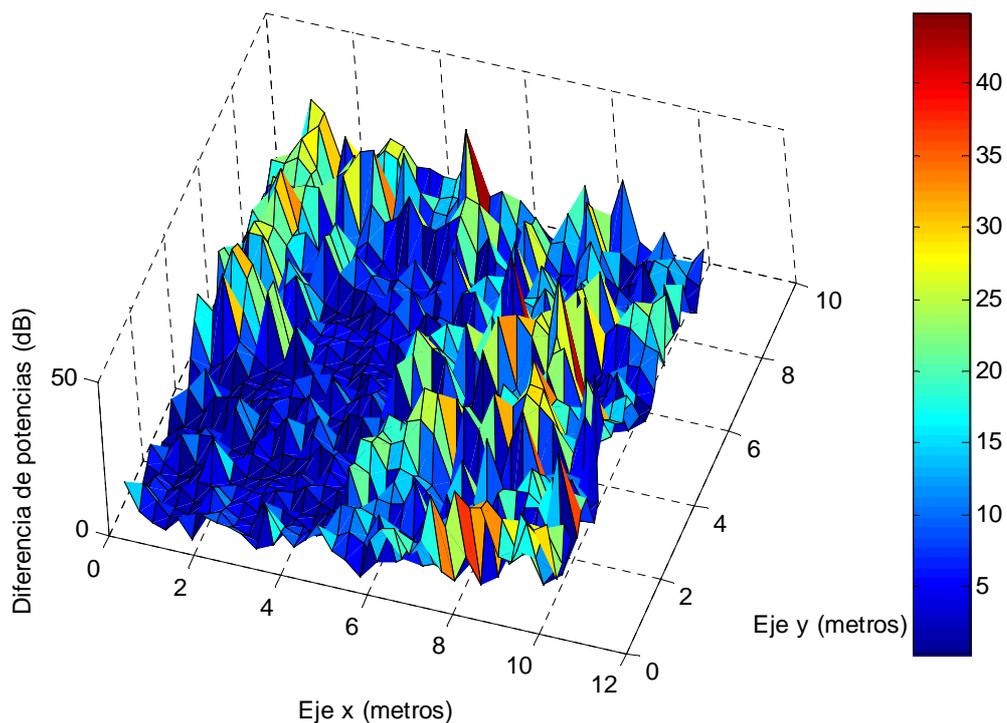


Figura 3.35. Representación 3D de la diferencia entre los resultados del lanzador y el Trazador 3D a 60 Ghz en la casa típica de una planta [15]

Estas diferencias entre los niveles de potencia observadas se deben principalmente a que el Trazador 3D tiene en cuenta las características de las paredes tal como observamos en la Figura 3.32, aparte de los rayos reflejados en el techo y suelo. Además un trazador de rayos teóricamente debe ser más eficiente que un lanzador, puesto que éste último puede no tener en cuenta todos los rayos que llegan al receptor, es bidimensional (2D/2.5D), considera que todas las paredes están compuestas del mismo material y tienen la misma atenuación. Por todo ello podemos observar como en las zonas donde existe visión directa las diferencias de potencias entre los dos simuladores son menores, sin embargo para las zonas con NLOS las pérdidas son más elevadas debido a que en el lanzador no podemos distinguir entre diferentes paredes tal como mencionamos anteriormente.

En la Figura 3.33 podemos observar como la potencia recibida en las zonas indicadas es muy similar en ambos casos, debido principalmente a que transmisor y receptor están muy cerca y la contribución más importante es el rayo directo. Las pequeñas diferencias que pudieran existir se deben a los diferentes muebles como mesas, sillas, lámparas, etc. que en nuestro simulador no tuvimos en cuenta.

3.3. Simulaciones para distintas permitividades del material

3.3.1 Análisis de los resultados obtenidos para elementos con diferentes permitividades

En primer lugar procederemos a estudiar la influencia de la permitividad en la caracterización del canal. En la literatura científica encontramos diversos valores para la permitividad de los materiales utilizados en la construcción de edificios. El objetivo de este análisis es comprobar si las pérdidas varían de forma relevante entre los diferentes datos empleados.

- **Aglomerado**

Permitividad [22]	2.95-j0.19
Permitividad [15]	1.57-j0.096

Tabla 3.17 . Permitividades del aglomerado para distintos artículos

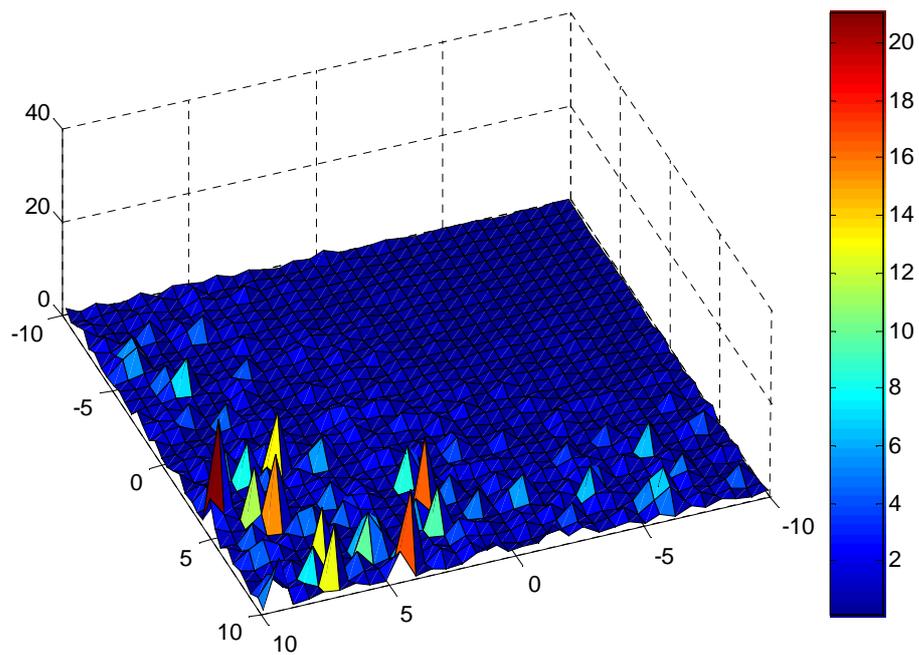


Figura 3.36. Diferencia de potencias recibidas entre las dos permitividades

Media de la diferencia	1.5491 dB
-------------------------------	-----------

En este caso la diferencia obtenida es considerable. Por ello habrá que tener especial cuidado al modelar el entorno de una estructura compuesto por materiales de aglomerado. Es importante asegurarse que el material con el que trabajamos tiene una permitividad similar a la que empleamos en el simulador. Es de destacar que en este caso, la permitividad que indica el artículo [15] no deja claro si el material es madera o aglomerado. En dicho artículo se menciona que la madera es uno de los elementos que componen la vivienda, sin embargo únicamente aparecen los datos de permitividad del aglomerado, y este valor es muy similar a la permitividad de la madera que indica el artículo [18]. Por todo ello asumimos que en [15] se está empleando madera en vez de aglomerado. Sin embargo, es interesante comparar los resultados de cada valor para apreciar el grado de similitud entre ambos materiales.

- Yeso

Permitividad [22]	2.58-j0.091
Permitividad [15]	2.81-j0.046

Tabla 3.18. Permitividades del yeso para distintos artículos

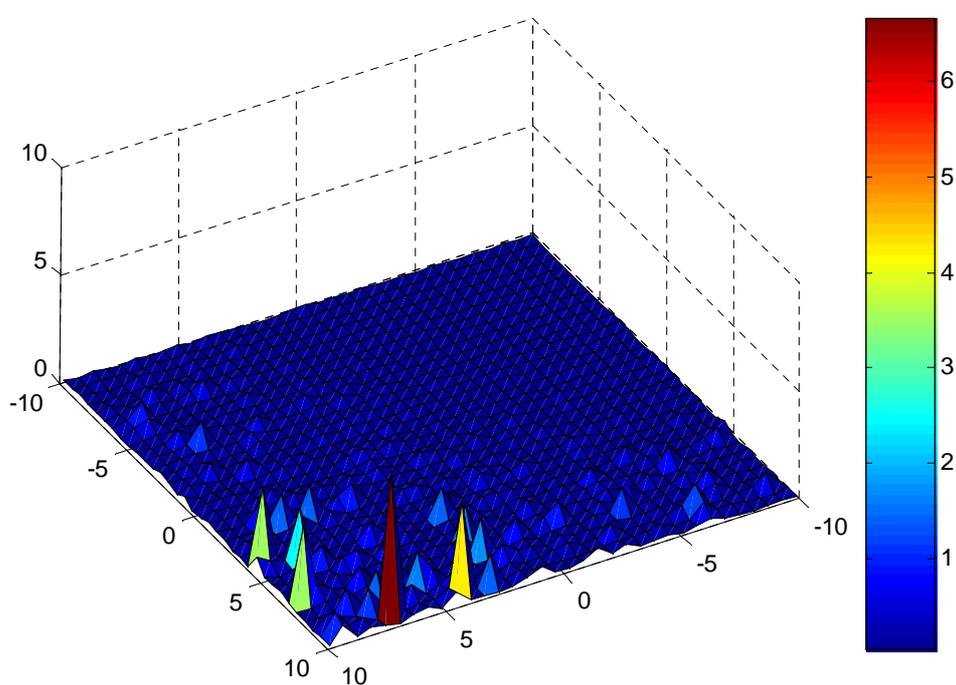


Figura 3.37. Diferencia de potencias recibidas entre las dos permitividades

Media de la diferencia	0.265 dB
------------------------	----------

- **Cemento**

Permitividad [17]	6.5-j0.43
Permitividad [18]	6.14-j0.3011

Tabla 3.19. Permitividades del cemento para distintos artículos

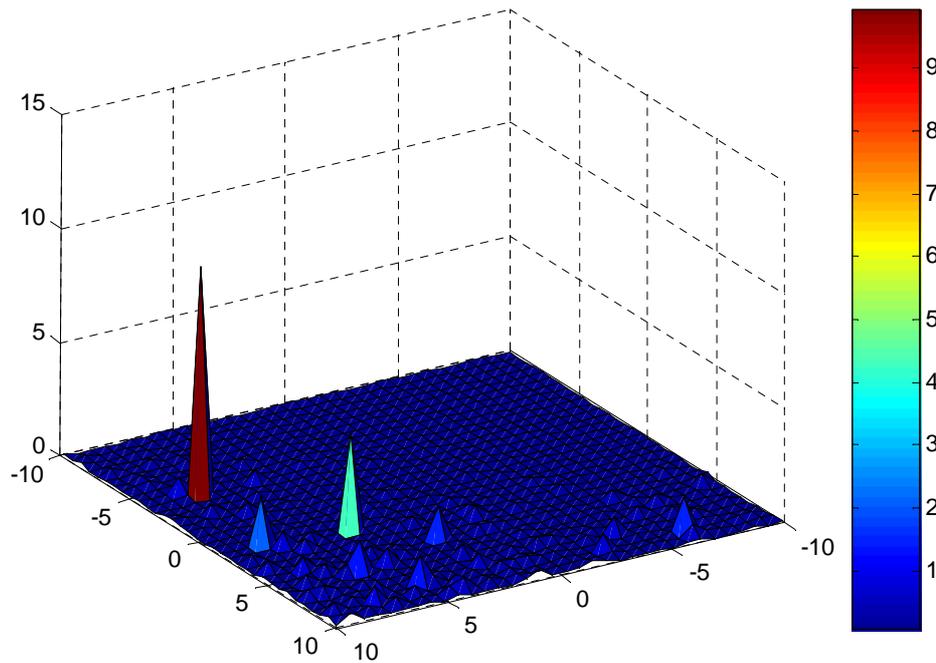


Figura 3.38. Diferencia de potencias recibidas entre las dos permitividades

Media de la diferencia	0.2144 dB
-------------------------------	-----------

Para estos dos últimos casos, yeso y cemento, observamos diferencias que rondan los 0.2 dB. Esto implica diferencias no muy elevadas, por lo que será más sencillo modelar las distintas estructuras a simular, sin que se produzcan errores a considerar.

En segundo lugar realizaremos una serie de simulaciones en un mismo punto del transmisor y receptor para comprobar cómo varía el exceso de retardo medio para diferentes situaciones:

✚ Cemento

- Permitividad = $6.14-j0.3011$

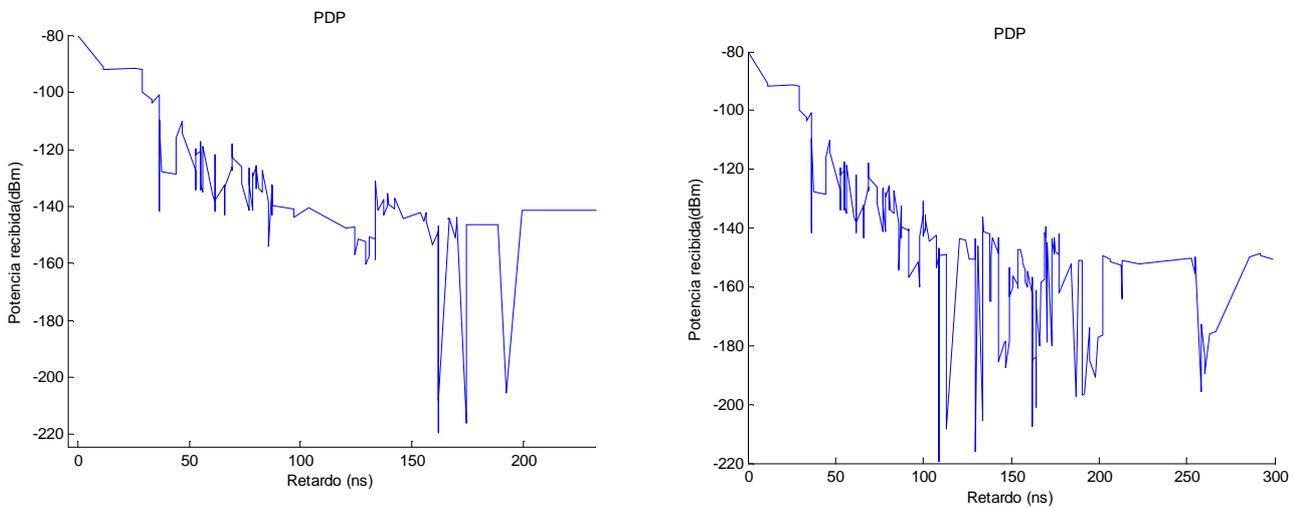


Figura 3.39. PDP para 4 y 5 reflexiones como máximo

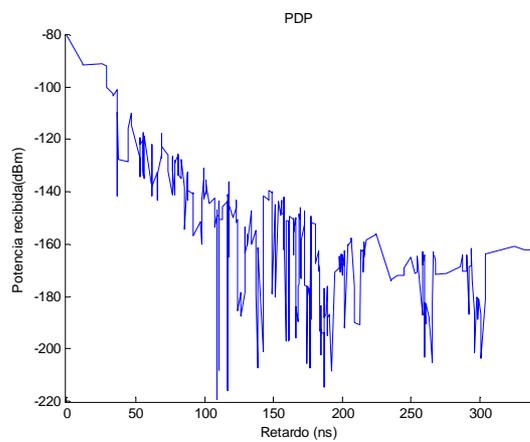


Figura 3.40. PDP para 6 reflexiones como máximo

Exceso de retardo medio -4 reflexiones	5.379 ns
Exceso de retardo medio -5 reflexiones	5.375 ns
Exceso de retardo medio -6 reflexiones	5.376 ns

Tabla 3.20. Exceso de retardo medio para diferentes casos del cemento

- Permitividad = 6.5-j0.43

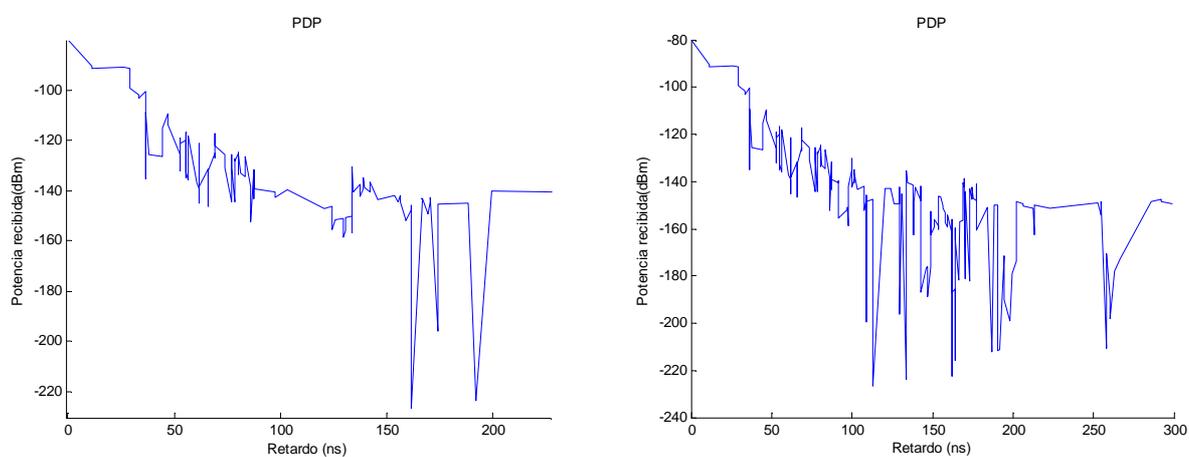


Figura 3.41. PDP para 4 y 5 reflexiones como máximo

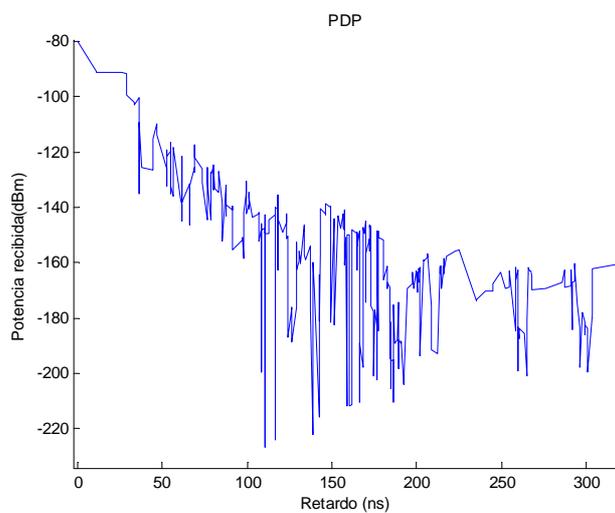


Figura 3.42. PDP para 6 reflexiones como máximo

Exceso de retardo medio -4 reflexiones	5.618 ns
Exceso de retardo medio -5 reflexiones	5.620 ns
Exceso de retardo medio -6 reflexiones	5.620 ns

Tabla 3.21. Exceso de retardo medio para diferentes casos del cemento

✚ Aglomerado

- Permitividad = 2.95 - j0.19

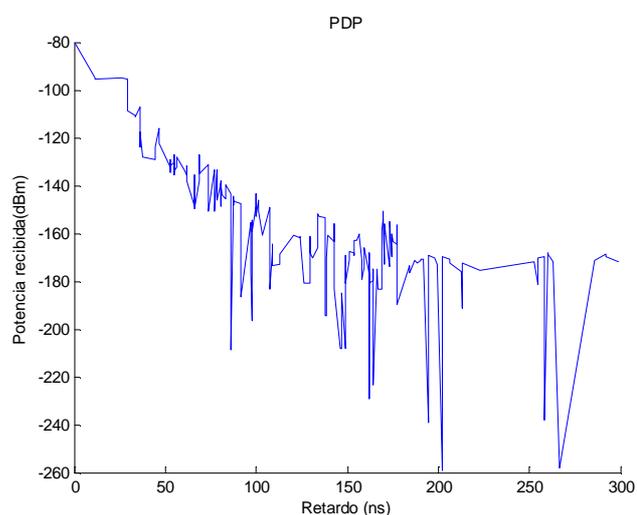
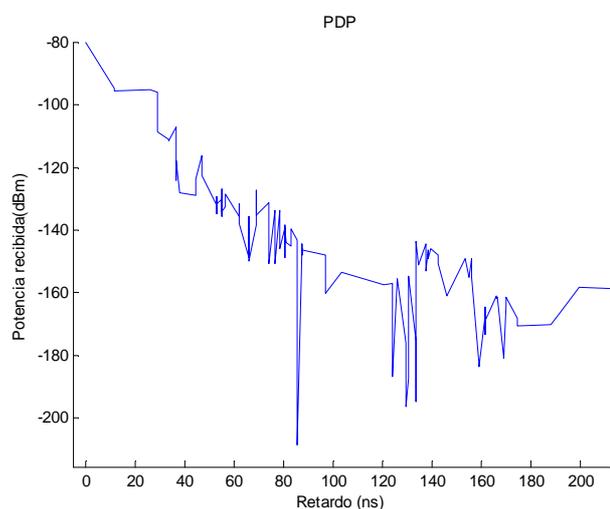


Figura 3.43. PDP para 4 y 5 reflexiones como máximo

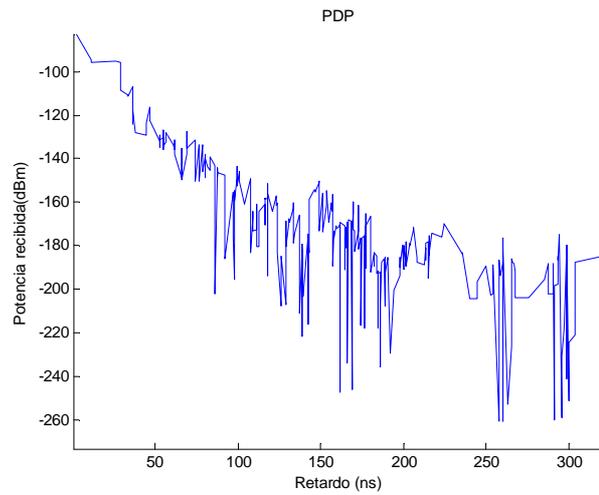


Figura 3.44. PDP para 6 reflexiones como máximo

Exceso de retardo medio -4 reflexiones	2.346 ns
Exceso de retardo medio -5 reflexiones	2.346 ns
Exceso de retardo medio -6 reflexiones	2.345 ns

Tabla 3.22. Exceso de retardo medio para diferentes casos del cemento

- Permitividad = 1.57 - j0.096

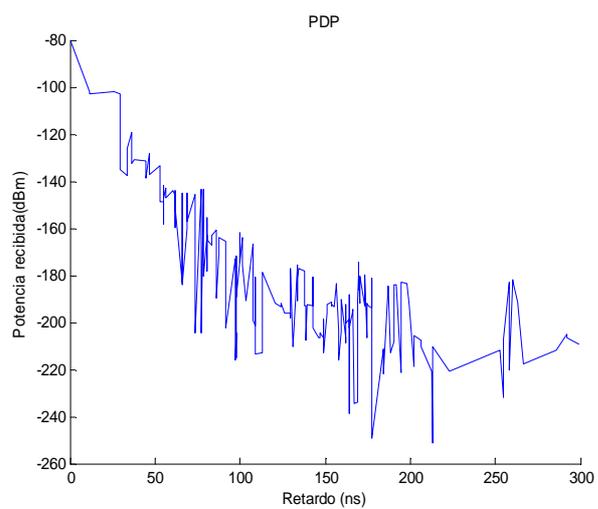
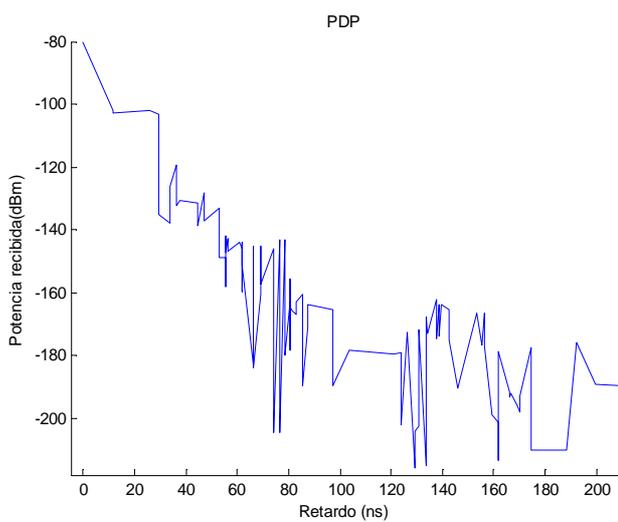


Figura 3.45. PDP para 4 y 5 reflexiones como máximo

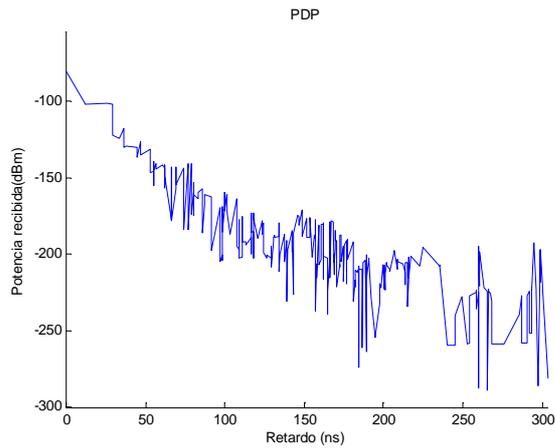


Figura 3.46. PDP para 6 reflexiones como máximo

Exceso de retardo medio -4 reflexiones	0.471 ns
Exceso de retardo medio -5 reflexiones	0.471 ns
Exceso de retardo medio -6 reflexiones	0.471 ns

Tabla 3.23. Exceso de retardo medio para diferentes casos del cemento

Yeso

- Permitividad = 2.58 - j0.091

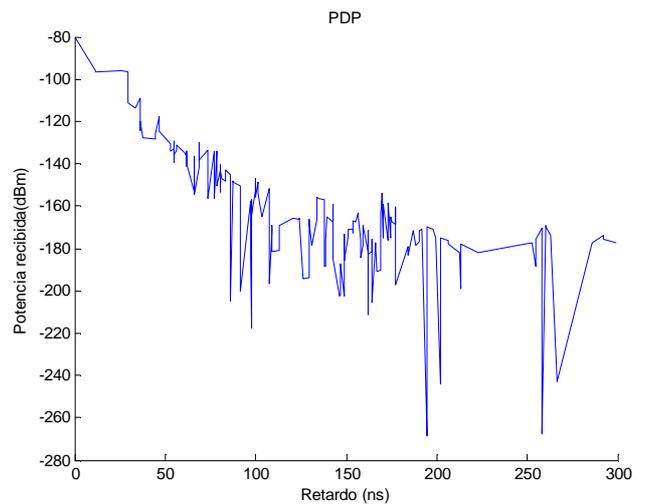
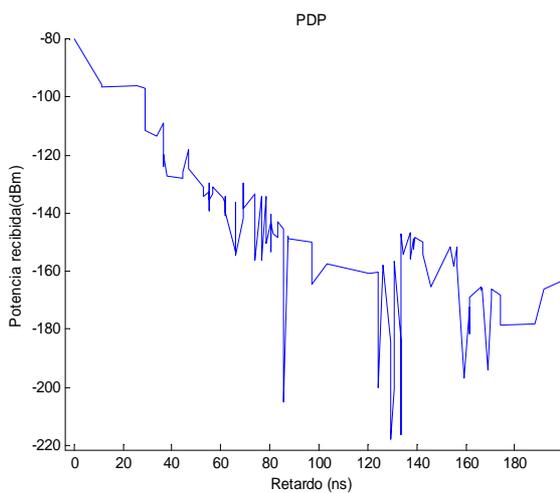


Figura 3.47. PDP para 4 y 5 reflexiones como máximo

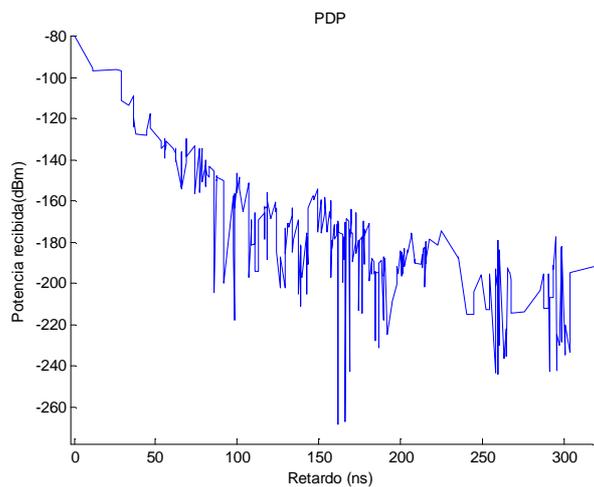


Figura 3.48. PDP para 6 reflexiones como máximo

Exceso de retardo medio -4 reflexiones	1.858 ns
Exceso de retardo medio -5 reflexiones	1.858 ns
Exceso de retardo medio -6 reflexiones	1.858 ns

Tabla 3.24. Exceso de retardo medio para diferentes casos del cemento

- Permitividad = 2.81 - j0.046

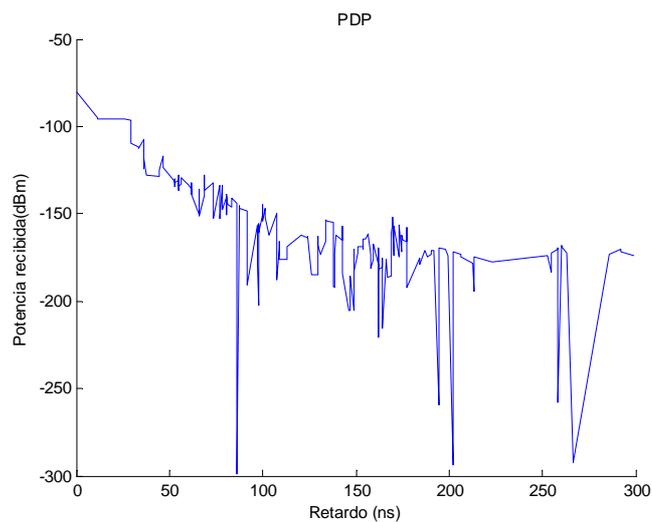
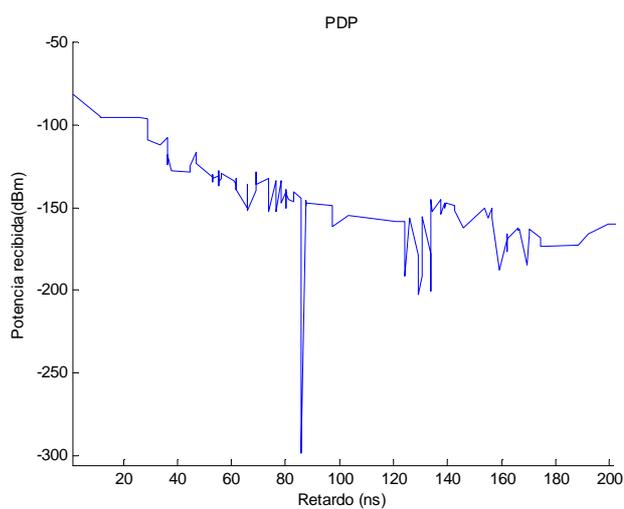


Figura 3.49. PDP para 4 y 5 reflexiones como máximo

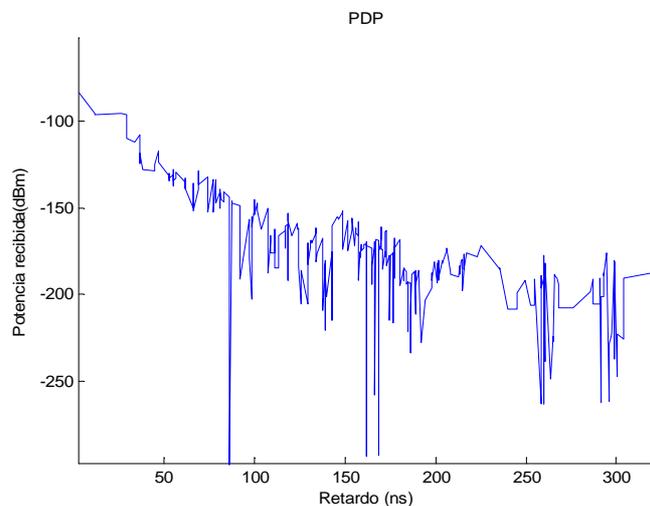
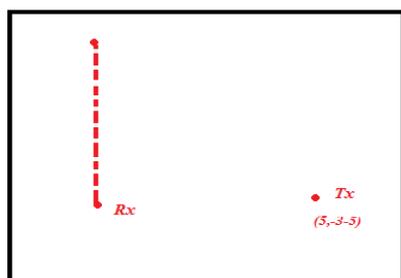


Figura 3.50. PDP para 6 reflexiones como máximo

Exceso de retardo medio - 4 reflexiones	2.159 ns
Exceso de retardo medio - 5 reflexiones	2.159 ns
Exceso de retardo medio - 6 reflexiones	2.162 ns

Tabla 3.25. Exceso de retardo medio para diferentes casos del cemento

Tabla de resultados



El receptor se desplaza desde a lo largo del eje tal como vemos en la gráfica. Tomaremos una serie de puntos y los compararemos en una tabla con diferentes permitividades.

Figura 3.51. Desplazamiento del receptor en la habitación

Posición Rx	Cemento $\epsilon_r = 6.5 - j0.43$	Cemento $\epsilon_r = 6.14 - j0.3011$	Aglomerado $\epsilon_r = 2.95 - j0.19$	Aglomerado $\epsilon_r = 1.57 - j0.096$
(-5,-5,5)	2.467 ns	2.347 ns	0.970 ns	0.187 ns
(-5,-4,5)	2.893 ns	2.753 ns	1.145 ns	0.221 ns
(-5,-3,5)	3.568 ns	3.401 ns	1.437 ns	0.281 ns
(-5,-2,5)	4.440 ns	4.240 ns	1.830 ns	0.362 ns
(-5,-1,5)	3.009 ns	2.867 ns	1.207 ns	0.235 ns
(-5,0,5)	1.818 ns	1.730 ns	0.717 ns	0.139 ns
(-5,1,5)	1.986 ns	1.888 ns	0.772 ns	0.147 ns
(-5,2,5)	2.386 ns	2.269 ns	0.929 ns	0.176 ns
(-5,3,5)	1.011 ns	0.958 ns	0.379 ns	0.071 ns
(-5,4,5)	5.125 ns	4.906 ns	2.183 ns	0.446 ns
(-5,5,5)	3.759 ns	3.599 ns	1.626 ns	0.341 ns
(-5,6,5)	5.938 ns	5.710 ns	2.714 ns	0.589 ns
(-5,7,5)	6.182 ns	5.943 ns	2.809 ns	0.609 ns
(-5,8,5)	2.943 ns	2.805 ns	1.198 ns	0.249 ns

Tabla 3.26. Exceso de retardo medio

Comparando gráficamente los resultados obtenidos para el cemento:

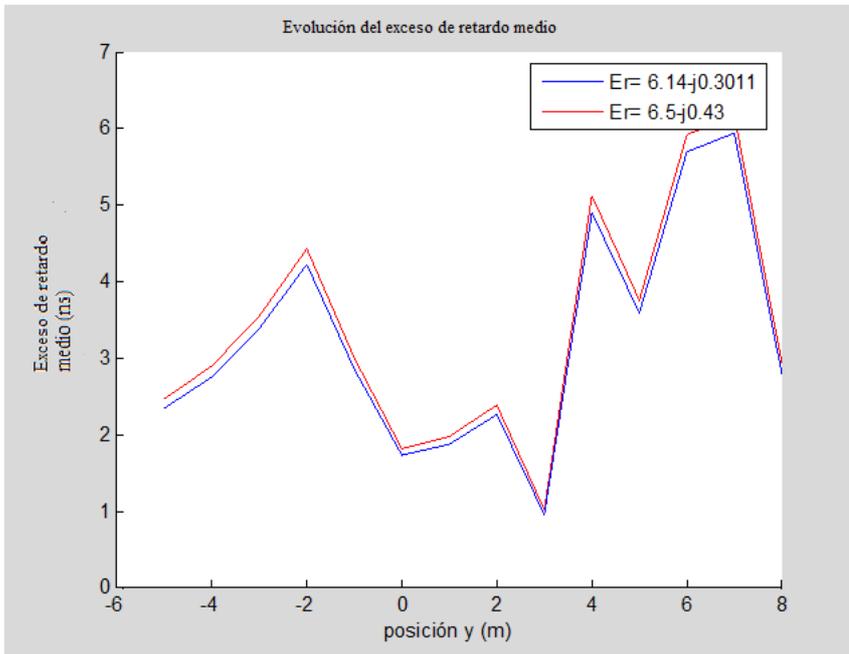


Figura 3.52. Evolución del exceso de retardo medio para distintas permitividades del cemento

Comparando gráficamente los resultados obtenidos para el aglomerado:

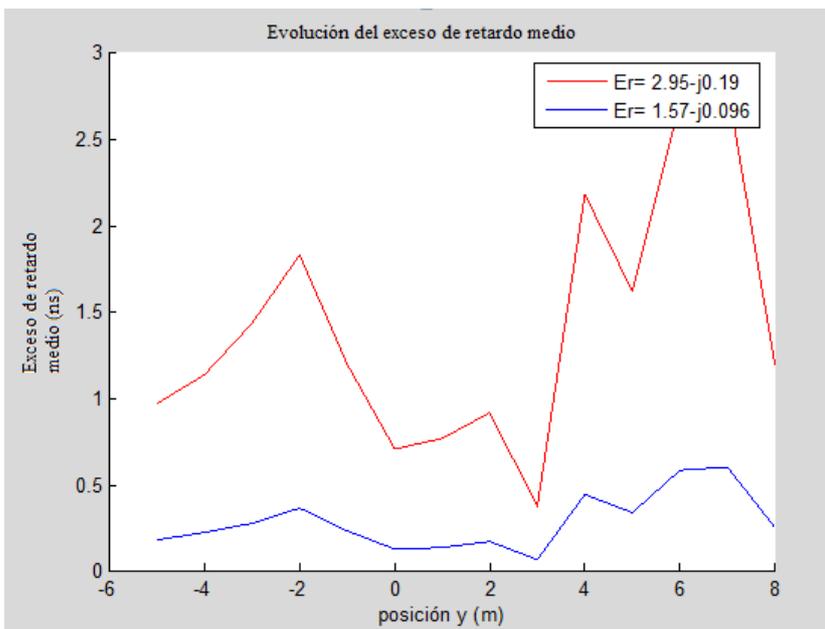


Figura 3.53. Evolución del exceso de retardo medio para distintas permitividades del aglomerado

Tal como ocurría con las simulaciones realizadas para obtener la potencia para cada una de las permitividades de los materiales, observamos que para el caso del aglomerado (Figura 3.53) los resultados muestran diferencias apreciables. Sin embargo, en el caso del cemento las variaciones en los resultados obtenidos son prácticamente despreciables.

Como conclusión podemos afirmar que en el caso del cemento estas pequeñas variaciones de la permitividad no afectan en gran medida a la señal recibida. La variación en la potencia, tal como podemos observar en la Figura 3.40, es muy leve, y la evolución del exceso de retardo medio (Figura 3.50) es muy similar en ambos casos. Consecuentemente a la hora de simular habitaciones con materiales de cemento tendremos una alta seguridad de que los valores de la permitividad no variarán en exceso. Podemos sacar las mismas conclusiones para el yeso, puesto que el empleo de las distintas permitividades mencionadas no influye en gran medida sobre los resultados.

3.3.2 Estudio de la influencia de la variación de la permitividad en las simulaciones realizadas en el laboratorio de medidas del edificio I+D+I.

En este apartado se seguirá estudiando los diferentes resultados que se obtienen para materiales con distintas permitividades, pero centrándonos en esta ocasión en una estructura real. Dicha estructura será uno de los laboratorios del edificio de I+D+I.

Estas simulaciones tendrán como principal objetivo el comprobar el nivel de variación que se producen en los resultados dependiendo del material empleado. Un mismo material puede tener diferentes permitividades según la humedad, el tipo de método empleado para calcularla dicha permitividad, etc. tal como vimos en apartados anteriores. Con todo ello, nos aseguraremos que a la hora de comparar con simulaciones reales los resultados sean lo más fidedignos posibles.

La estructura que emplearemos en esta ocasión es la siguiente:

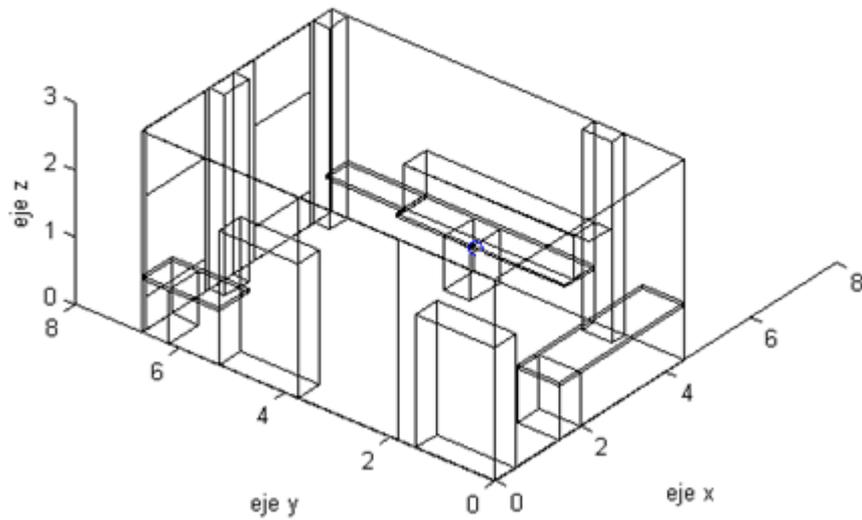


Figura 3.54. Representación del Laboratorio I+D+I empleado en el simulador

El laboratorio está constituido por un suelo de cemento y unas paredes y techo de yeso. Supondremos una serie de armarios y mesas de madera que formarán parte de la habitación y serán de gran influencia en los resultados obtenidos. A la misma vez el laboratorio consta de dos grandes ventanas de cristal.

Una vez hemos definido las características de la estructura a simular procederemos a realizar una serie de simulaciones a 60 Ghz:

- **1ª Simulación. Potencia recibida en todo el laboratorio**

Tx: (1,1,1.5)

3 reflexiones máximo

<i>Material</i>	<i>Permitividad</i>
<i>Yeso</i>	<i>2.25-0.03i</i>
<i>Cemento</i>	<i>6.14-0.301i</i>
<i>Madera</i>	<i>1.57-0.096</i>
<i>Cristal</i>	<i>6.81-0.176i</i>

Tabla 3.27. Permitividades de los materiales empleados

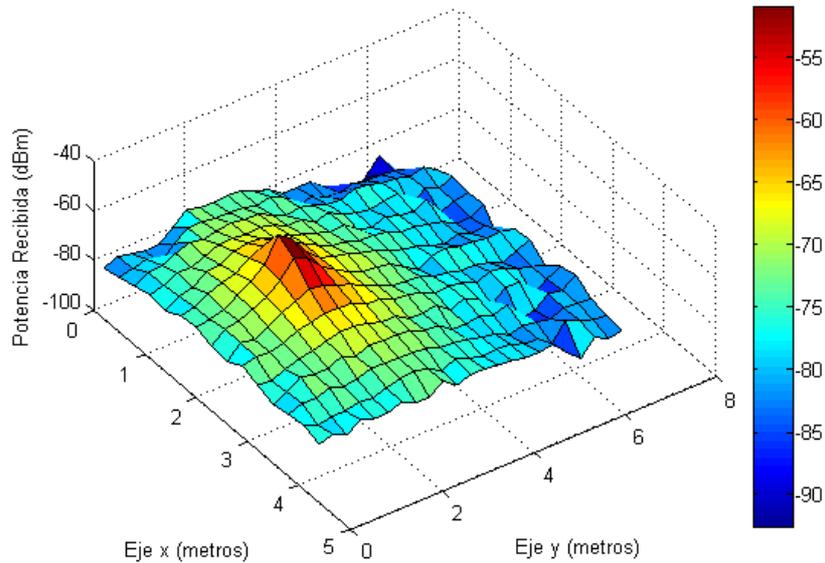


Figura 3.55. Representación de la potencia recibida en el laboratorio I+D+I

En la Figura 3.55 se puede observar la potencia que recibiría un receptor situado en cada uno de los puntos posibles de la habitación. Para llevar a cabo un análisis más detallado realizaremos unas nuevas simulaciones, en las que simularemos un rango de frecuencias para un punto fijo del receptor, pero con diferentes valores de las permitividades de los materiales empleados.

• 2ª Simulación. Potencia para un rango de frecuencia para dos casos (I)

$T_x: (1,1,0.7)$

$R_x: (3.5,5,0.7)$

3 reflexiones máximo

Caso 1

Caso 2

Material	Permitividad
Yeso	2.81-0.046i
Cemento	6.5-0.43i
Madera	1.54-0.095
Cristal	6.94-0.176i

Material	Permitividad
Yeso	2.25-0.03i
Cemento	6.14-0.301i
Madera	1.57-0.096
Cristal	6.81-0.176i

Tabla 3.28. Permitividades de los materiales empleados para los dos casos

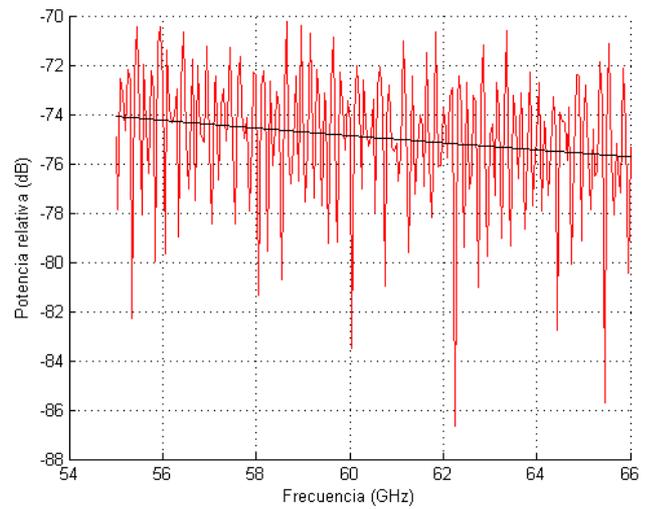
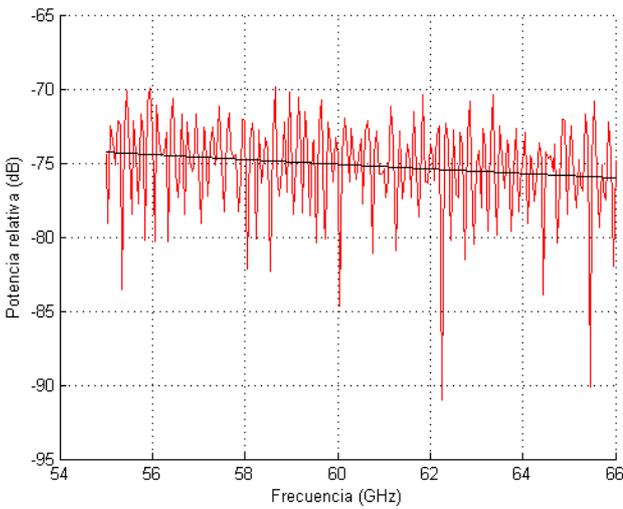


Figura 3.56. Representación de la potencia recibida en el rango de 55-66 GHz

Media= -75.1614 dB

Media = -74.928 dB

Como se puede observar, la variación que se produce es tan sólo de 0.2334 dB.

- **3ª Simulación. Potencia para un rango de frecuencia para dos casos (II)**

Tx: (1,3,0.7)

Rx: (3.5,5,0.7)

3 reflexiones máximo

Caso 1

Caso 2

<i>Material</i>	<i>Permitividad</i>
<i>Yeso</i>	<i>2.81-0.046i</i>
<i>Cemento</i>	<i>6.5-0.43i</i>
<i>Madera</i>	<i>1.54-0.095</i>
<i>Cristal</i>	<i>6.94-0.176i</i>

<i>Material</i>	<i>Permitividad</i>
<i>Yeso</i>	<i>2.25-0.03i</i>
<i>Cemento</i>	<i>6.14-0.301i</i>
<i>Madera</i>	<i>1.57-0.096</i>
<i>Cristal</i>	<i>6.81-0.176i</i>

Tabla 3.29. Permitividades de los materiales empleados para los dos casos

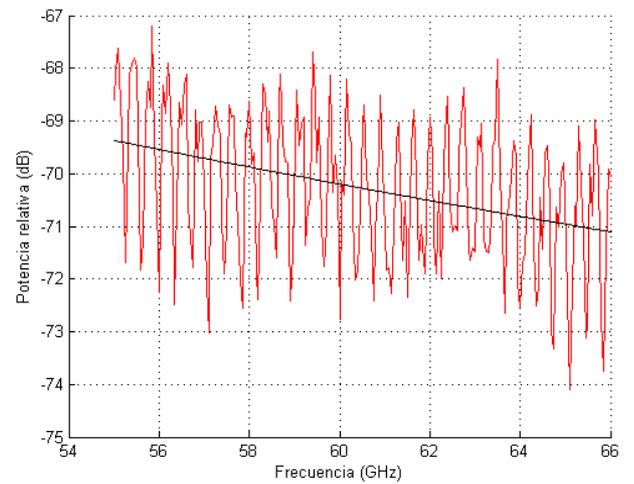
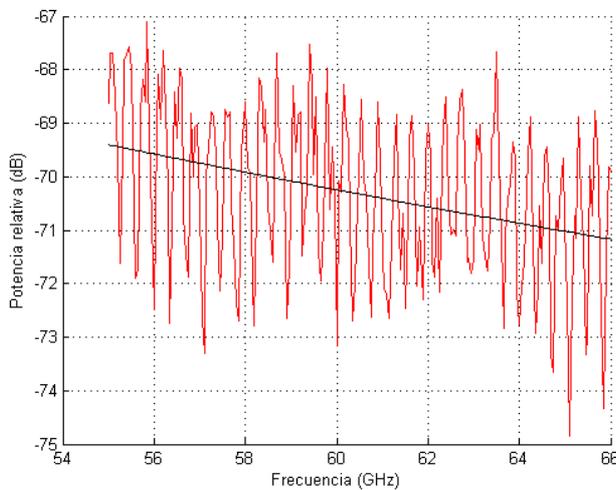


Figura 3.57. Representación de la potencia recibida en el rango de 55-66 GHz

Media= -70.313 dB

Media = -70.2645 dB

En esta simulación, al variar la posición de las antenas, se obtiene una diferencia entre los dos casos de tan sólo 0.048 dB. Por lo que se puede afirmar que no es muy influyente el escoger uno u otro valor de permitividad de un material en la Tabla 2.3. Los

resultados como se ha podido comprobar en esta simulación no varían de forma relevante entre los dos casos.

- **4ª Simulación. Power-Delay Profile a 60 GHz(I)**

Tx: (1,1,0.7)

Rx: (3.5,5,0.7)

3 reflexiones máximo

Caso 1

Caso 2

Material	Permitividad
Yeso	2.81-0.046i
Cemento	6.5-0.43i
Madera	1.54-0.095
Cristal	6.94-0.176i

Material	Permitividad
Yeso	2.25-0.03i
Cemento	6.14-0.30i
Madera	1.57-0.096
Cristal	6.81-0.176i

Tabla 3.30. Permitividades de los materiales empleados para los dos casos

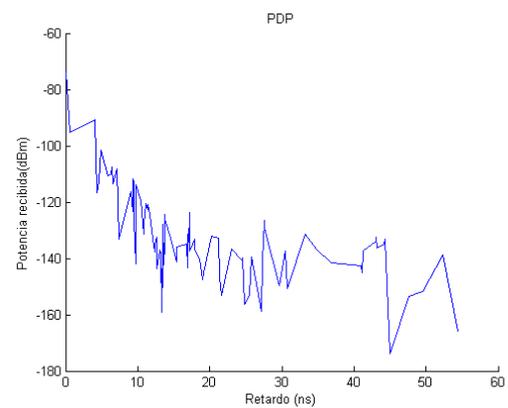
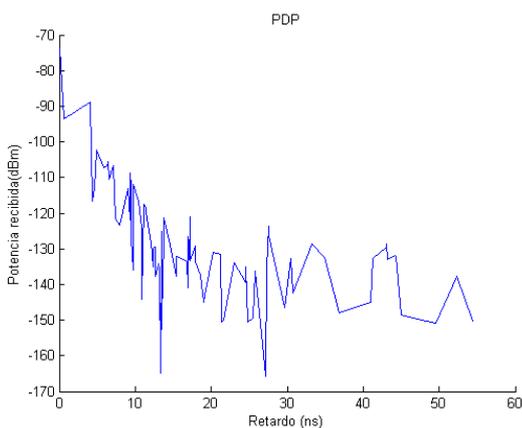


Figura 3.58. Representación del PDP a 60 GHz para los dos casos

Rms = 3.184 ns

Rms= 3.216 ns

- 5ª Simulación. Power-Delay Profile a 60 GHz (II)

Tx: (1,3,0.7)

Rx: (3.5,5,0.7)

3 reflexiones máximo

Caso 1

Caso 2

<i>Material</i>	<i>Permitividad</i>
<i>Yeso</i>	<i>2.81-0.046i</i>
<i>Cemento</i>	<i>6.5-0.43i</i>
<i>Madera</i>	<i>1.54-0.095</i>
<i>Cristal</i>	<i>6.94-0.176i</i>

<i>Material</i>	<i>Permitividad</i>
<i>Yeso</i>	<i>2.25-0.03i</i>
<i>Cemento</i>	<i>6.14-0.30i</i>
<i>Madera</i>	<i>1.57-0.096</i>
<i>Cristal</i>	<i>6.81-0.176i</i>

Tabla 3.31. Permitividades de los materiales empleados para los dos casos

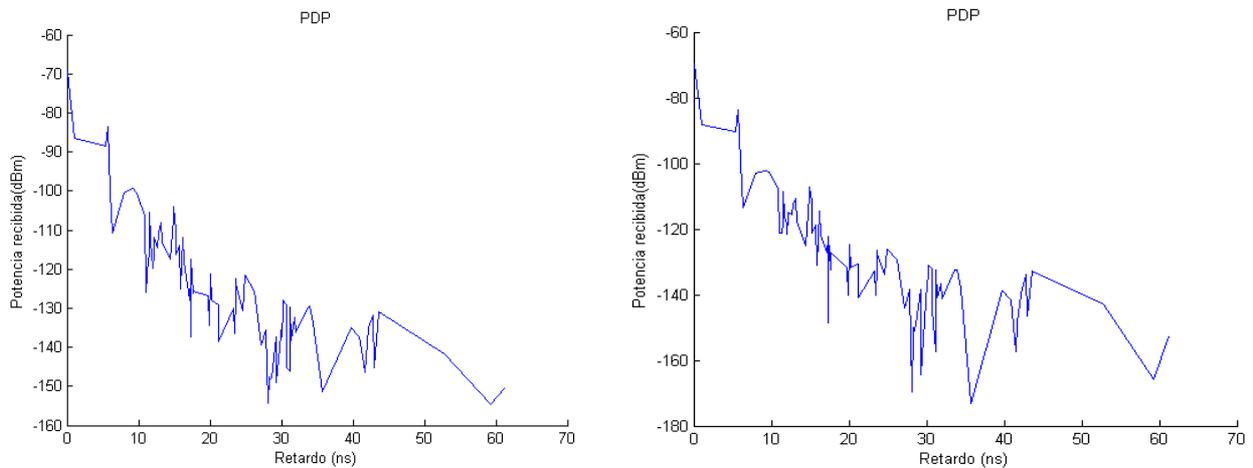


Figura 3.59. Representación del PDP a 60 GHz para los dos casos

Rms = 3.211 ns

Rms= 3.179 ns

Capítulo 4

Estudio del canal a 60 GHz mediante el trazador 3D: comparación con medidas reales.

4.1 Introducción

En este cuarto capítulo realizaremos una comparativa entre una serie de medidas reales realizadas en distintas instalaciones de la Universidad Politécnica de Cartagena con los resultados obtenidos por nuestro simulador empleando los mismos datos y características.

Caracterizaremos el entorno lo más fielmente posible con nuestro simulador, de forma que la estructura que emplearemos en las simulaciones sea lo más parecida posible a la estructura en donde se realizan las medidas reales.

En primer lugar, se realizarán medidas sencillas en las que el transmisor y receptor estarán separados por una distancia no superior a un metro en el laboratorio SICOMO de la Universidad Politécnica de Cartagena. Posteriormente, se realizarán nuevas pruebas en una habitación del edificio de I+D+I. Los resultados que obtengamos serán comparados con las mediciones realizadas por el equipo adquirido por la Universidad Politécnica de Cartagena, un analizador de redes (VNA Rhode ZVA67), que es capaz de trabajar en un ancho de banda que cubren las frecuencias comprendidas en 10 MHz y los 67 GHz.



Figura 4.1. VNA Rhode ZVA67 [13]

Un analizador de redes es capaz de medir los parámetros de “scattering” (parámetros S) de cualquier dispositivo conectado a sus puertos. Gracias a esta capacidad un analizador de redes puede ser empleado para medir la función de transferencia del canal en el dominio de la frecuencia. Tal como podemos observar en la Figura 4.2 el analizador de redes VNA Rhode ZVA67 sirve para medir el parámetro S_{21} , es decir, el canal radio en las frecuencias de interés. Para cada frecuencia el equipo de test de parámetros S transmite una señal conocida por el puerto 1 y mide la señal recibida en el puerto 2. Con esto conseguimos obtener el parámetro S_{21} que mide la relación entre la señal recibida respecto a la señal transmitida [Pas10]. Si ésta es aproximadamente un impulso, es decir una señal sinusoidal, el parámetro S_{21} es una representación de la respuesta al impulso del canal radio en el dominio de la frecuencia. Esta respuesta se convierte al dominio de tiempo gracias a un procesador que aplica la transformada inversa de Fourier discreta [21].

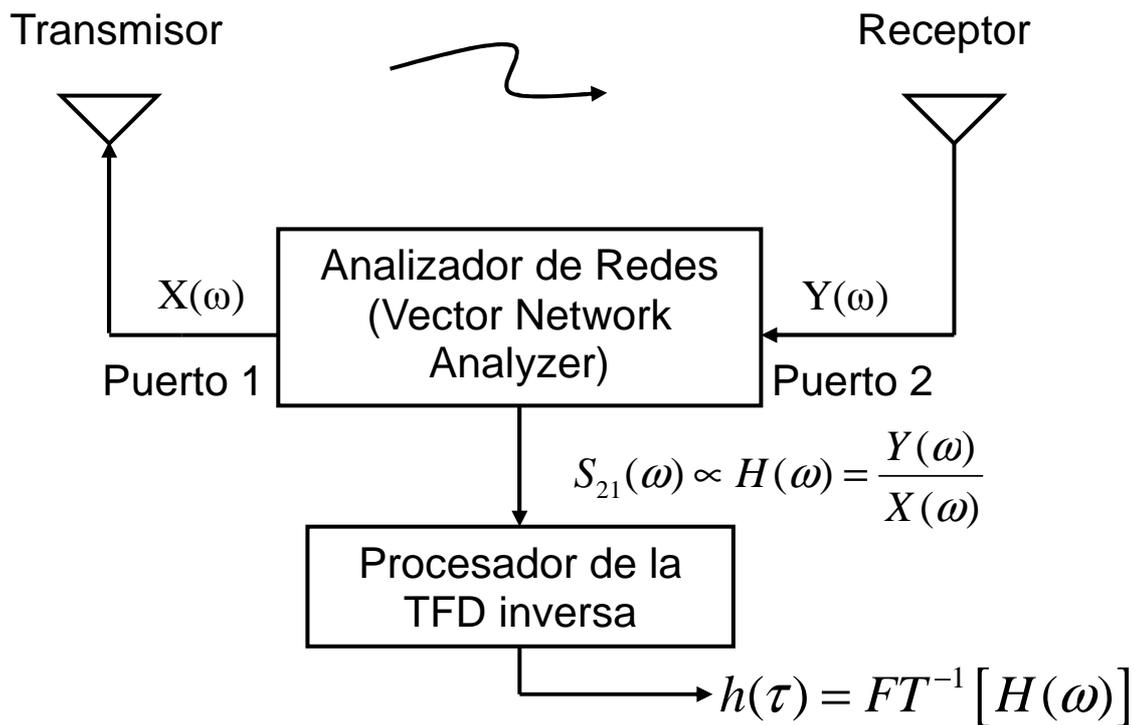


Figura 4.2. Esquema de funcionamiento de un analizador de redes [Pas10][21]

4.2 Mediciones en el laboratorio SICOMO

4.2.1 Descripción del entorno

Estas primeras medidas se han llevado a cabo en el laboratorio SiCoMo de la Universidad Politécnica de Cartagena. Este laboratorio consiste en una habitación de dimensiones 5.5x5.0x4.0 metros y está compuesto por un conjunto de armarios, mesas y ordenadores. Las paredes son de yeso, y el suelo y el techo están compuestos de cemento [13]. Podemos observar una foto realizada en dicho laboratorio:



Figura 4.2. Foto del laboratorio SiCoMo [13]

4.2.2 Simulaciones y mediciones realizadas

Basándonos en los datos empleados y resultados obtenidos en [13] se realizarán una serie de simulaciones para comparar los resultados. En esta primera medida, al no disponer de los amplificadores necesarios, las antenas del transmisor y receptor únicamente se podrán separar un metro de distancia. Por lo tanto estarán en una situación de visión directa (LOS).

En este entorno, realizaremos una simulación en la que se obtendrá la potencia relativa del canal para un rango de frecuencias entre 57-66 Ghz.

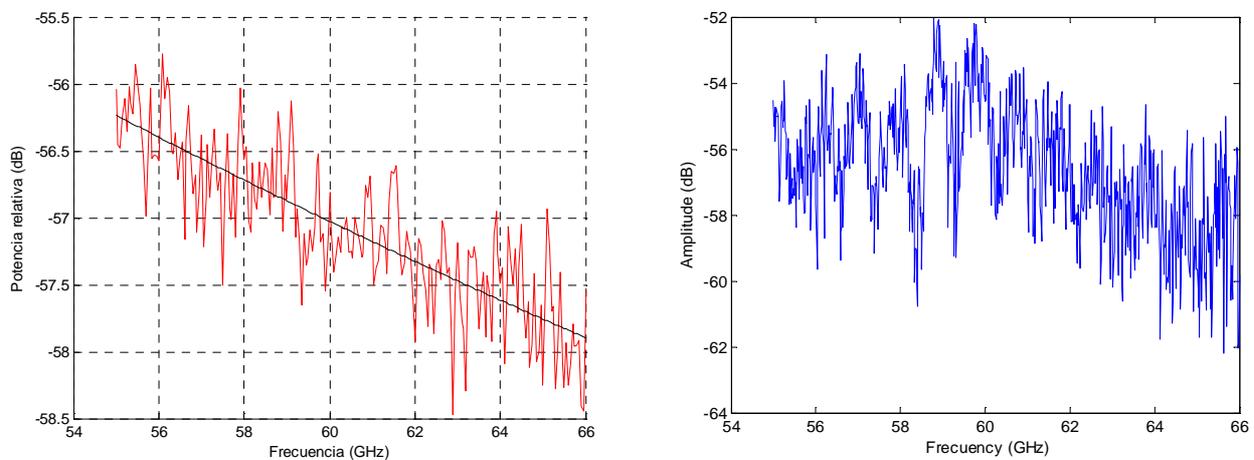


Figura 4.3. Potencia relativa entre 57-66 GHz obtenida por el simulador (izquierda) y por las mediciones reales (derecha)

Obtenemos las siguientes medias totales:

Media total simulación Trazador 3D	-56.58 dB
Media total mediciones reales	-57.08 dB

Tabla 4.1. Medias obtenidas en el laboratorio SiCoMo

Tal como se puede observar los resultados obtenidos son muy similares. Las diferencias que aparecen se pueden deber a los diferentes elementos que constituyen el laboratorio, que por su alta complejidad no se han podido modelar en el simulador. Estos elementos, como mesas, ordenadores, sillas, etc. provocan nuevos rayos reflejados con distintas características que llegarán al receptor provocando esta diferencia de 0.5 dB.

Sin embargo, de estas primeras medidas no se pueden sacar conclusiones claras puesto que la distancia entre las antenas es tan sólo de 1 metro. Para poder evaluar de forma más exacta el canal será preciso aumentar esta distancia entre el transmisor y receptor.

4.3 Mediciones en el laboratorio de medidas del edificio I+D+I

4.3.1 Descripción del entorno

En el siguiente apartado se llevarán a cabo una serie de medidas en el laboratorio de medidas ubicado en el edificio I+D+I de la Universidad Politécnica de Cartagena. A diferencia del apartado anterior, en estas nuevas mediciones sí se dispondrá de los amplificadores necesarios para realizar un estudio más completo del canal en todo el laboratorio.

El plano de dicho laboratorio es el siguiente:

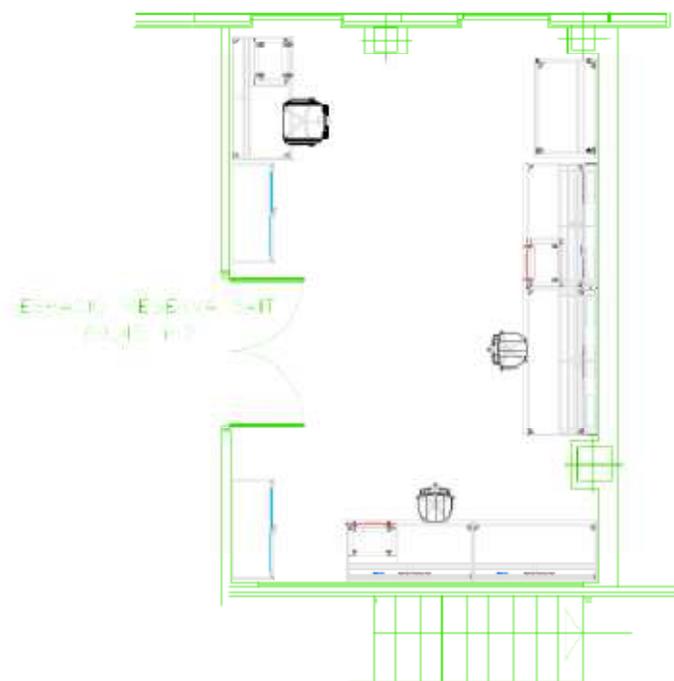


Figura 4.4. Plano del laboratorio SAIT del edificio I+D+I

Para caracterizar esta estructura en nuestro simulador emplearemos los siguientes materiales:

Elemento	Material	Permitividad	Conductividad
Techo	Yeso	2.81-0.046i	0.15
Suelo	Cemento	6.5-0.43i	1.43
Pared	Yeso	2.81-0.046i	0.15
Ventana	Cristal	6.94-0.176i	0.59
Puerta	Madera	1.54-0.095i	0.32

Tabla 4.2. Materiales empleados y sus características

A su vez, dotaremos a la estructura usada en el simulador de una mayor complejidad que el estudio realizado en el laboratorio SiCoMo. De esta forma alcanzaremos un grado de similitud mayor con la estructura real ya que ahora incluiremos toda una serie de elementos que componen el laboratorio estudiado (armarios, mesas, estanterías, etc.).

4.3.2 Respuesta en frecuencia. Estudio de la potencia

Se realizarán una serie de simulaciones para comparar los resultados del trazador con los obtenidos en las campañas de medidas llevadas a cabo en el laboratorio SAIT mediante el analizador de redes. El objetivo es comprobar el grado de similitud entre ambas mediciones.

En primer lugar se llevará a cabo un estudio de la potencia recibida por el receptor, variando la posición del transmisor.

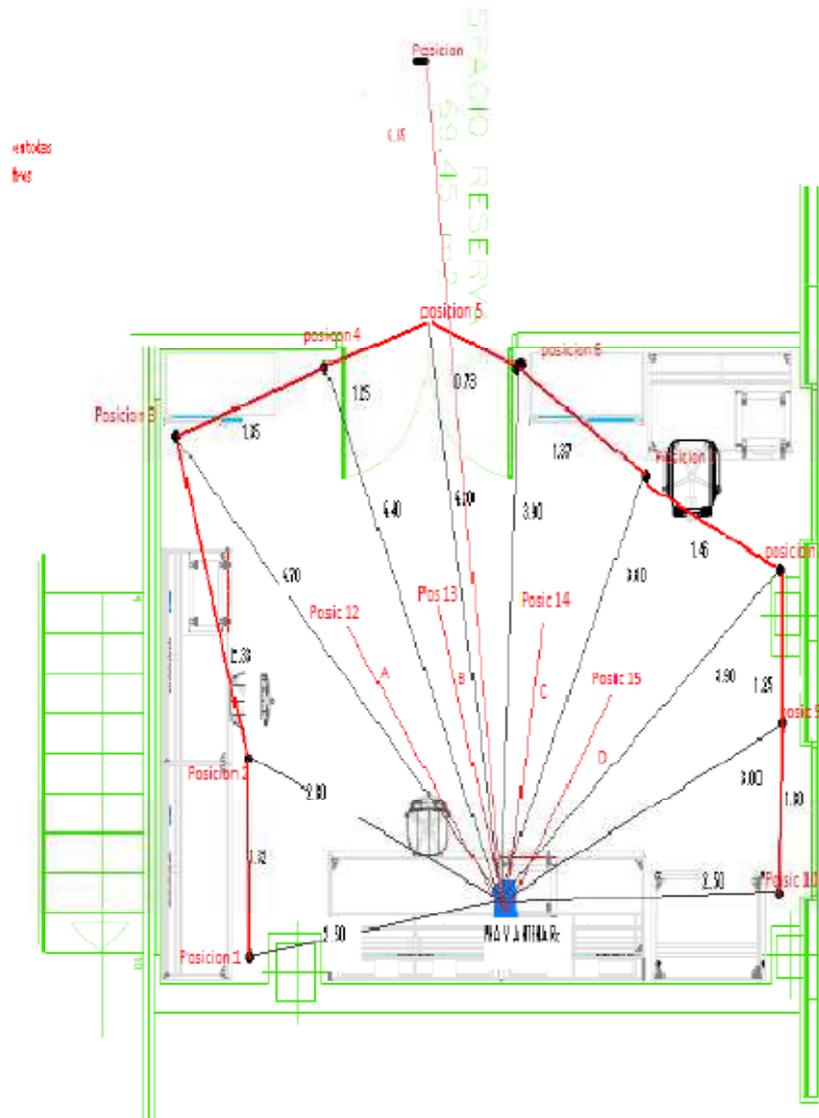


Figura 4.5. Plano de posiciones de medidas

La simulación se realizará para un ancho de banda comprendido entre los 57 y 66 GHz, con un total de 819 frecuencias. El número de reflexiones totales que sufrirá cada rayo será de dos. Seleccionamos este número ya que como pudimos comprobar en el capítulo 3 a partir de esta cantidad los resultados alcanzan una estabilidad suficiente.

A continuación representaremos los resultados de las simulaciones junto a los de las mediciones para cada una de las posiciones. Además representaremos la recta de regresión (R.R. en las gráficas) para cada conjunto. Con esto podremos observar y calibrar el nivel de eficiencia del simulador con respecto a los resultados reales:

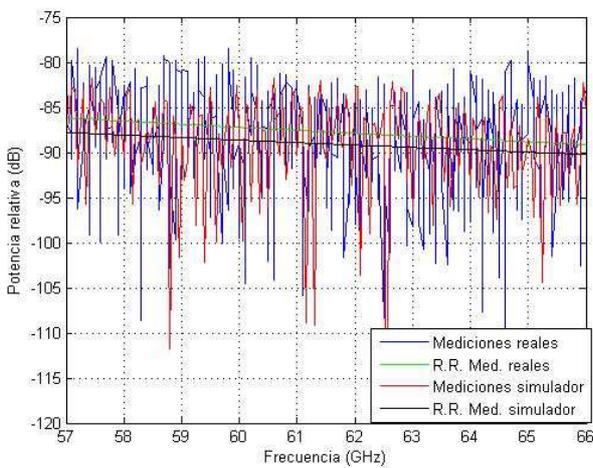


Figura 4.6. Potencia en la Posición 1

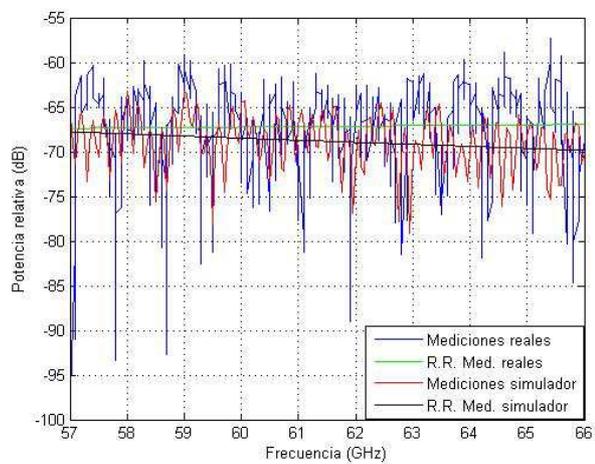


Figura 4.7. Potencia en la Posición 2

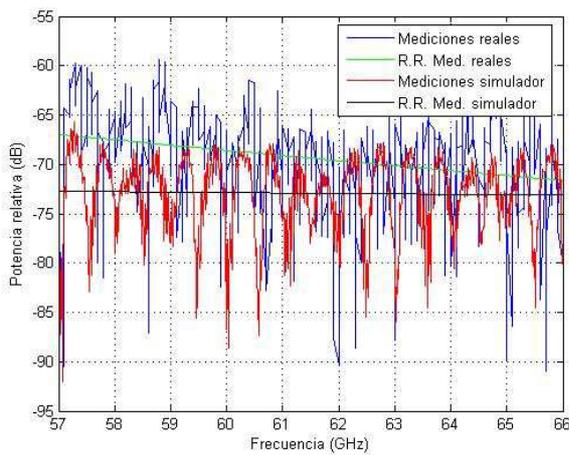


Figura 4.8. Potencia en la Posición 3

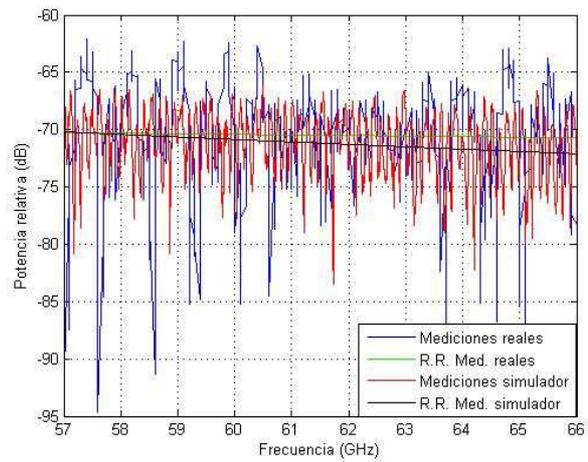


Figura 4.9. Potencia en la Posición 4

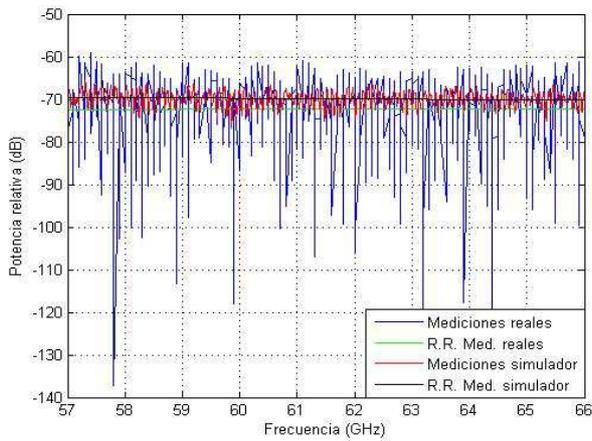


Figura 4.10. Potencia en la Posición 5

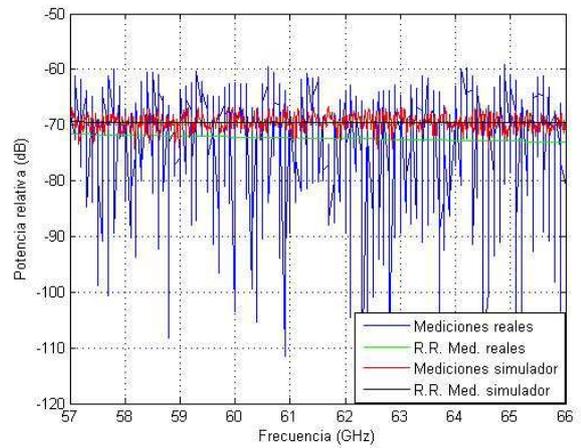


Figura 4.11. Potencia en la Posición 6

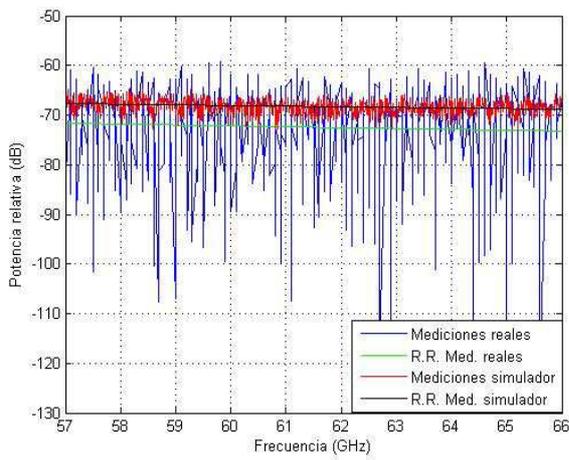


Figura 4.12. Potencia en la Posición 7

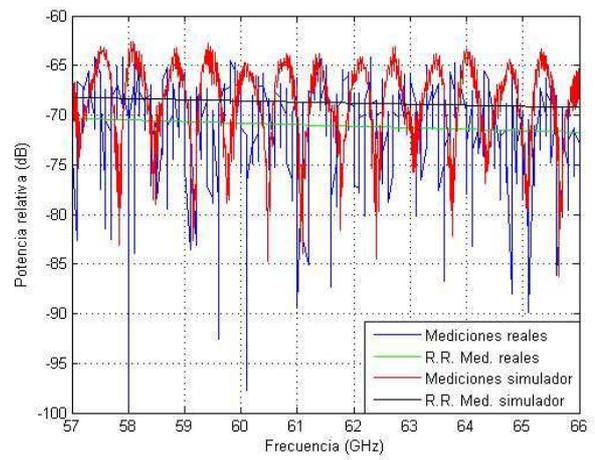


Figura 4.13. Potencia en la Posición 8

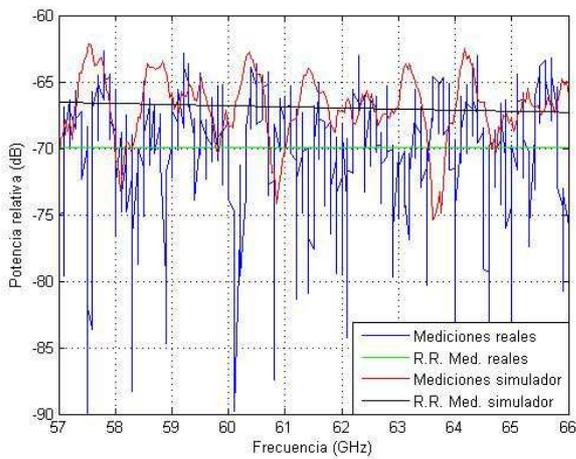


Figura 4.14. Potencia en la Posición 9

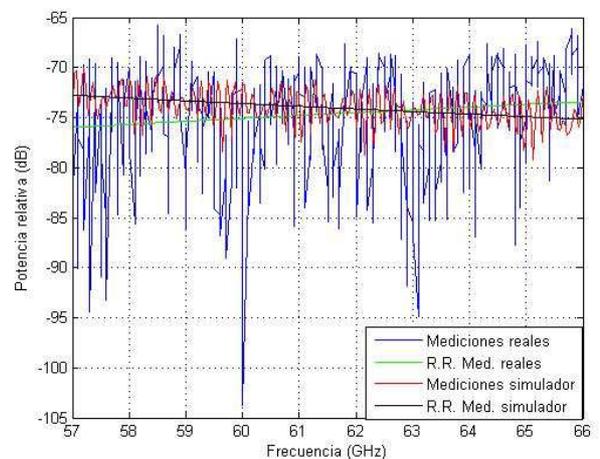


Figura 4.15. Potencia en la Posición 10

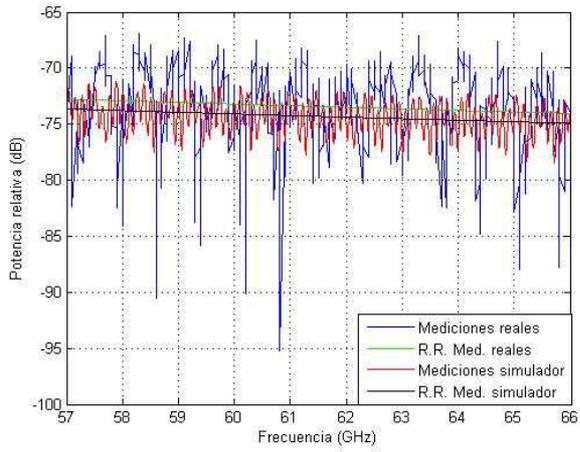


Figura 4.16. Potencia en la Posición 11

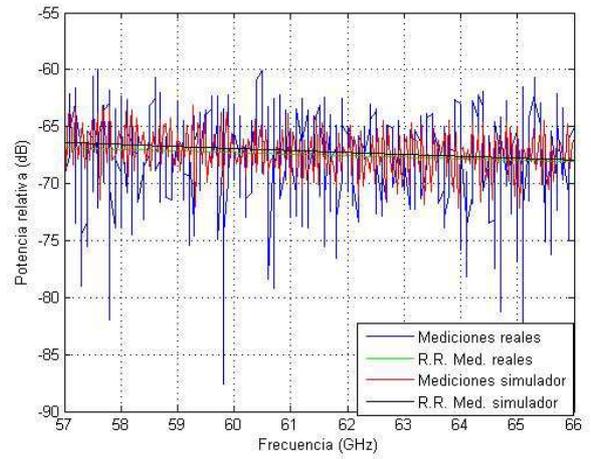


Figura 4.17. Potencia en la Posición 12

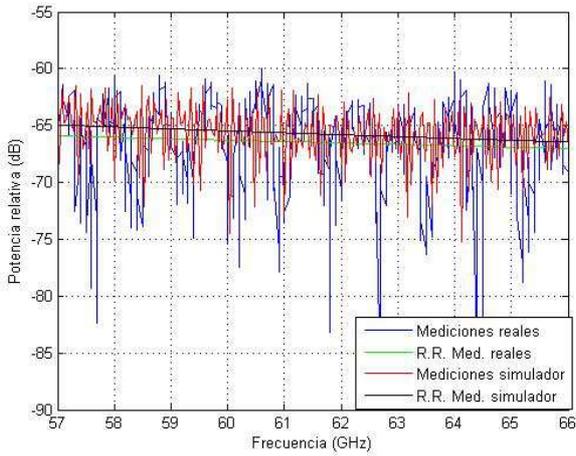


Figura 4.18. Potencia en la Posición 13

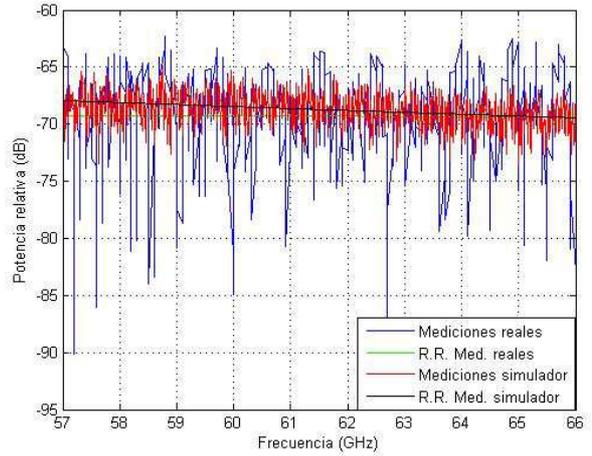


Figura 4.19. Potencia en la Posición 14

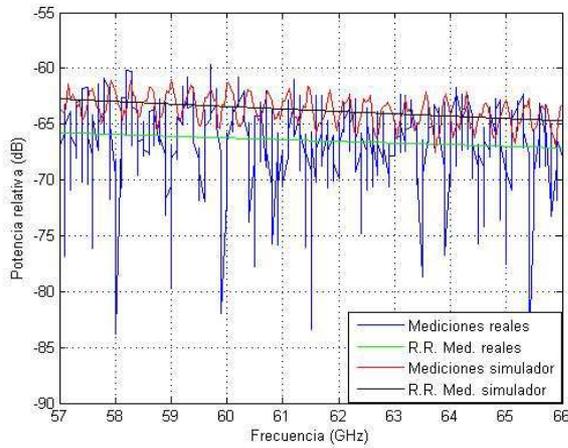


Figura 4.20. Potencia en la Posición 15

Podemos comparar de forma cuantitativa las medidas y las simulaciones mediante la comparación de la media de la potencia en el rango de frecuencias. Y posteriormente hallar la diferencia para observar de forma objetiva la semejanza entre ambas:

Posición	Potencia Media Med. Reales	Potencia Media Simulación	Diferencia	Posición	Potencia Media Med. Reales	Potencia Media Simulación	Diferencia
1	-87.43 dB	-88.89 dB	1.36 dB	9	-69.04 dB	-67.32 dB	1.72 dB
2	-66.07 dB	-68.14 dB	2.07 dB	10	-74.56 dB	-73.72 dB	0.84 dB
3	-68.15 dB	-70.23 dB	2.08 dB	11	-72.78 dB	-72.51 dB	0.27 dB
4	-69.49 dB	-69.74 dB	0.25 dB	12	-66.85 dB	-66.74 dB	0.11 dB
5	-68.62 dB	-69.48 dB	0.86 dB	13	-65.79 dB	-65.16 dB	0.63 dB
6	-68.25 dB	-68.69 dB	0.44 dB	14	-68.51 dB	-67.23 dB	1.28 dB
7	-68.43 dB	-67.92 dB	0.51 dB	15	-65.89 dB	-63.45 dB	2.44 dB
8	-70.14 dB	-67.68 dB	2.45 dB				

Tabla 4.3. Media de las potencias de las mediciones y simulaciones

Con estas primeras simulaciones se puede comprobar que el Trazador 3D obtiene resultados muy similares a los obtenidos en las mediciones reales, por debajo de los 3 dB, incluso en 8 posiciones por debajo de 1 dB.

Aunque el valor de la media es muy cercano a los datos reales, podemos observar como por ejemplo en las posiciones 5, 6 y 7 los resultados tienen una gran diferencia en las variaciones de la potencia. Calculando la varianza de las potencias respecto a la media para estos casos obtenemos un valor de 10,51 dB, 11,16 dB y 11,72 dB para las posiciones 5, 6 y 7 respectivamente. En el resto de las posiciones este valor no es tan acusado.

Por todo ello, podemos extraer una primera conclusión. Este simulador es válido para obtener niveles de potencia de forma muy cercana a los reales en diferentes puntos de una zona indoor a frecuencias comprendidas entre 57-66 GHz, como pueden ser habitaciones, laboratorios, despachos, etc.

4.3.2.2 Cálculo del Power Delay Profile (PDP) a partir de la respuesta en frecuencia.

A continuación, y empleando los datos de las simulaciones anteriores, calcularemos el PDP para cada una de las posiciones comparándolo con el PDP obtenido en las mediciones reales. El PDP se calcula mediante la transformada inversa de Fourier de la respuesta en frecuencia de un canal.

$$PDP(\tau) = |FFT^{-1}(H(F))|^2$$

Se suele usar un enventanado (en frecuencia) para reducir la amplitud de los lóbulos secundarios (en el tiempo) con el objetivo de obtener una respuesta más suave, sin la distorsión de los lóbulos. Para hacer esto se multiplica la respuesta en frecuencia por una ventana (hanning) de la misma longitud que las muestras.

$$PDP(\tau) = |FFT^{-1}(H(f) \cdot Ventana(f))|^2$$

Los resultados obtenidos son los siguientes:

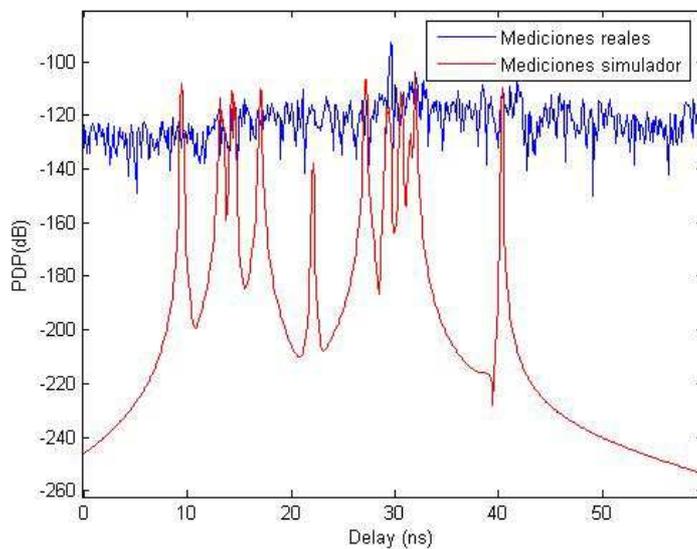


Figura 4.21. PDP para la posición 1

En el caso de la Figura 4.21, el transmisor se encuentra detrás de una columna, por lo que resultados obtenidos no son cercanos a los reales.

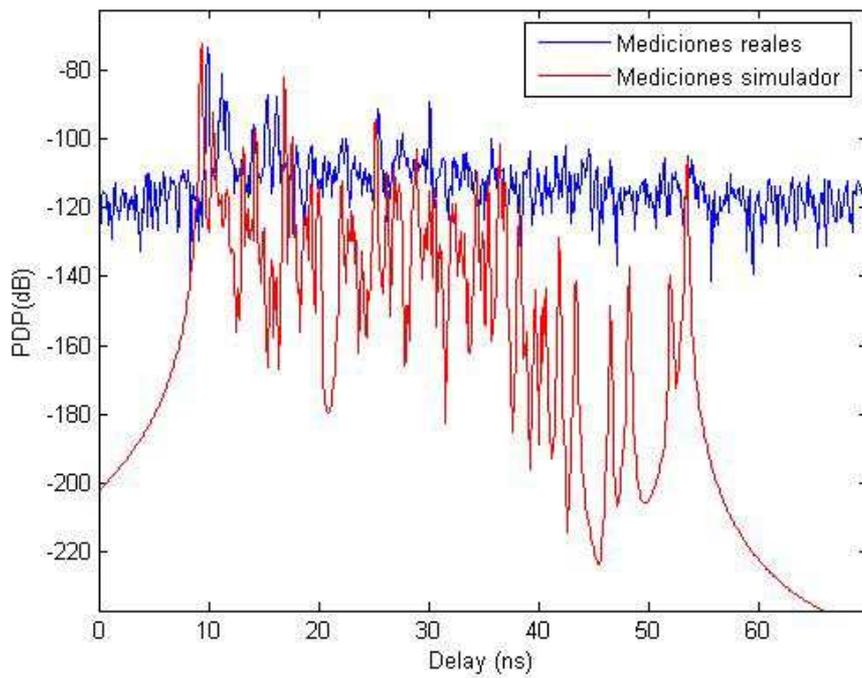


Figura 4.22. PDP para la posición 2

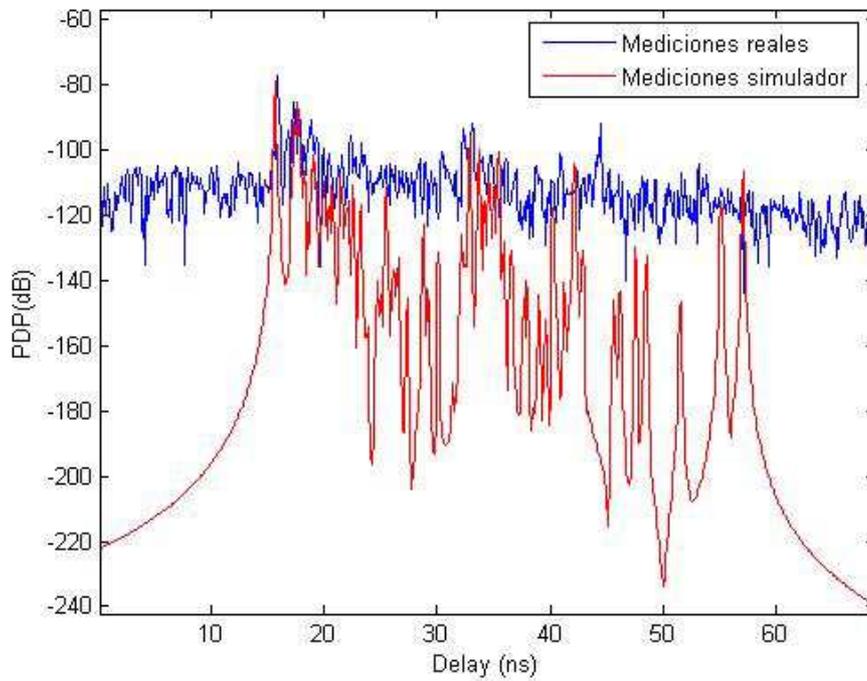


Figura 4.23. PDP para la posición 3

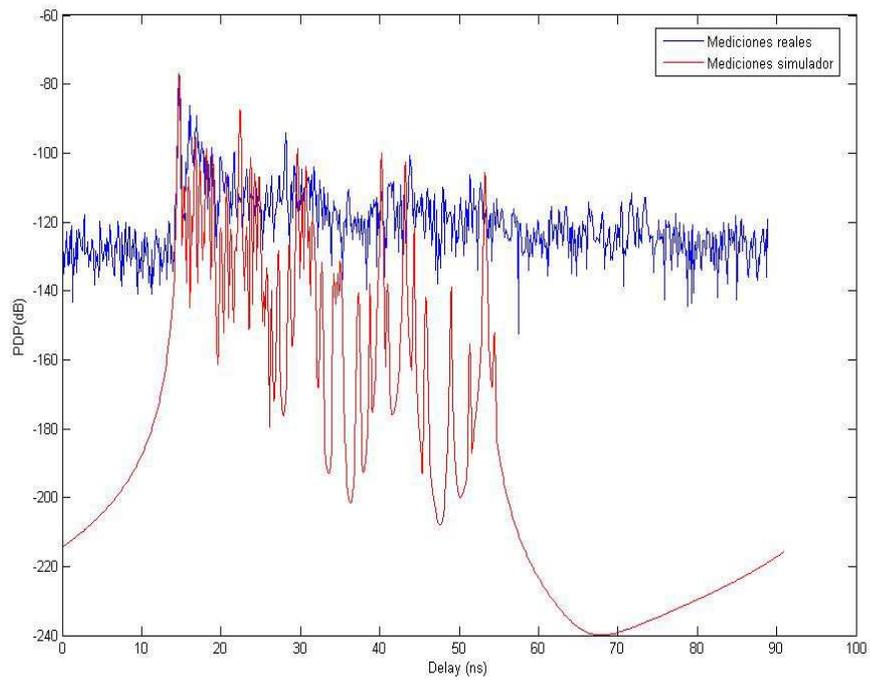


Figura 4.24. PDP para la posición 4

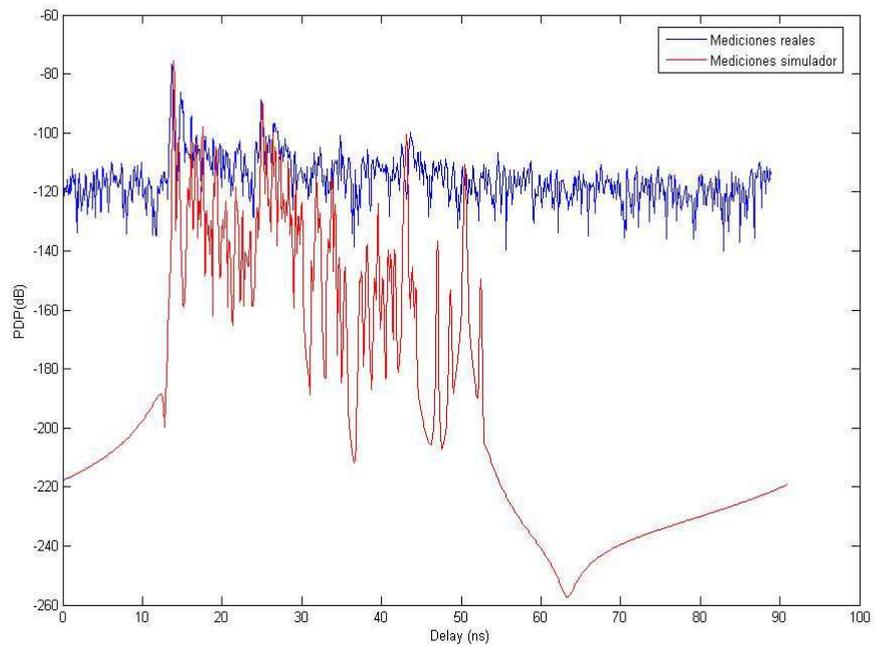


Figura 4.25. PDP para la posición 5

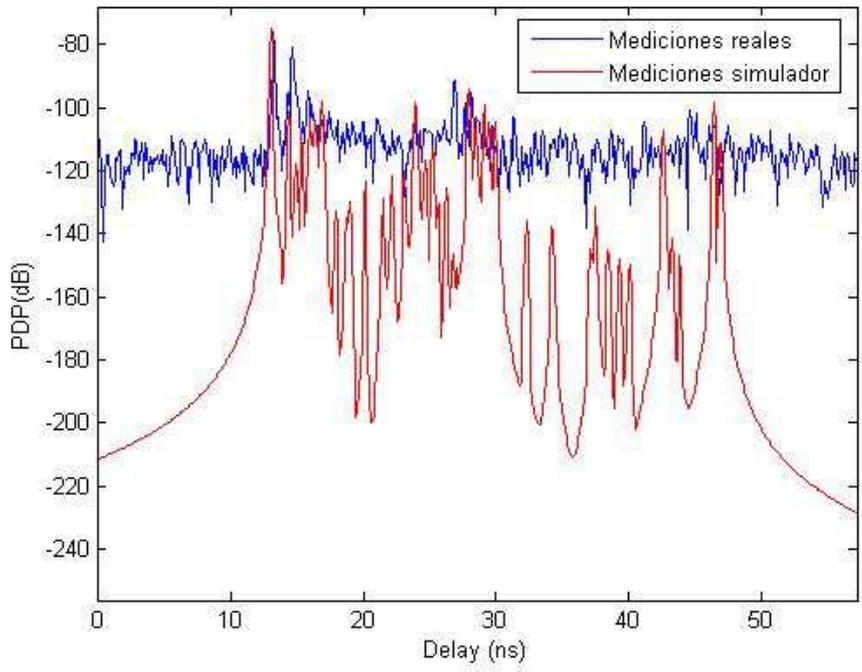


Figura 4.26. PDP para la posición 6

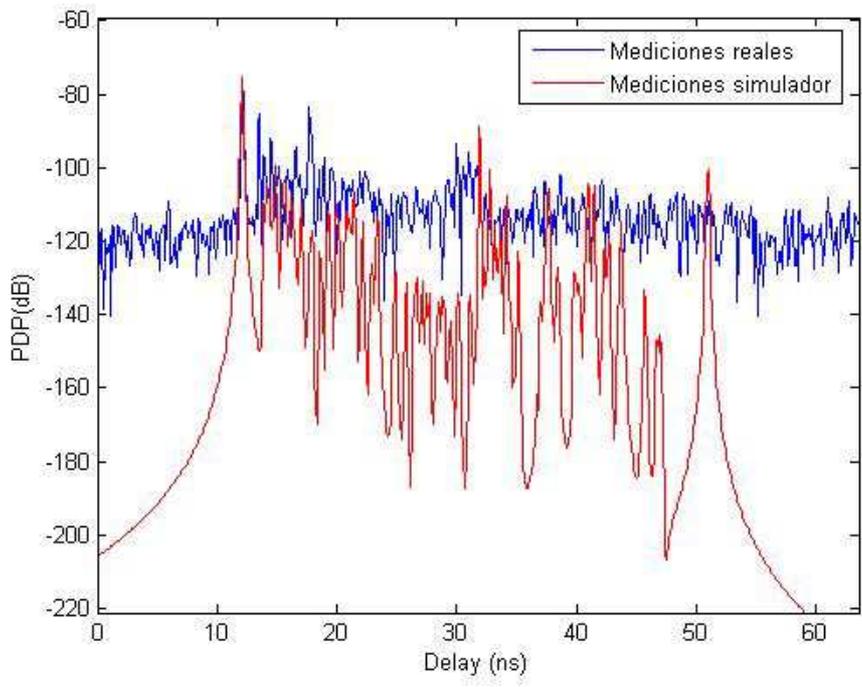


Figura 4.27. PDP para la posición 7

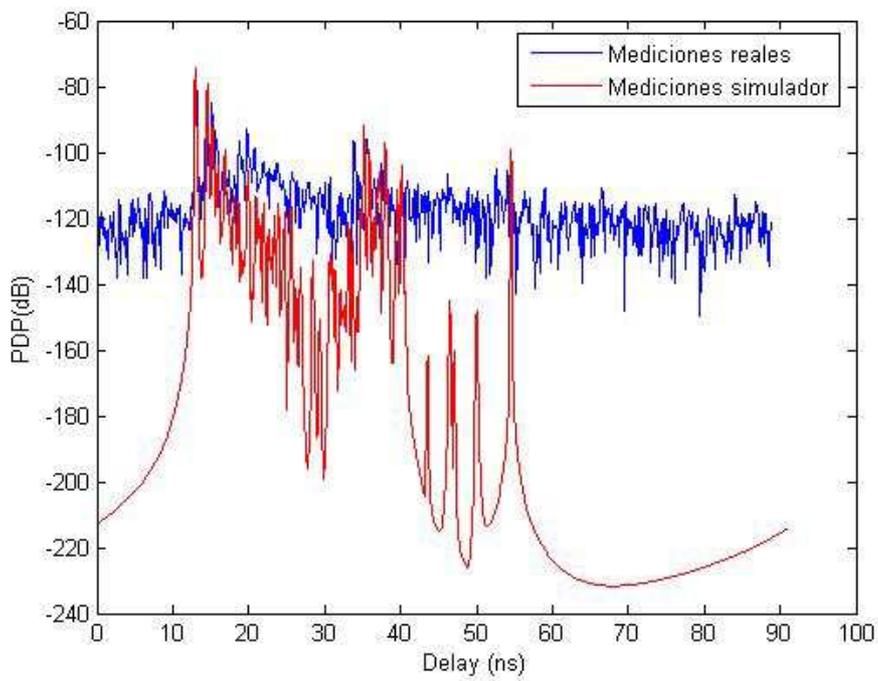


Figura 4.28. PDP para la posición 8

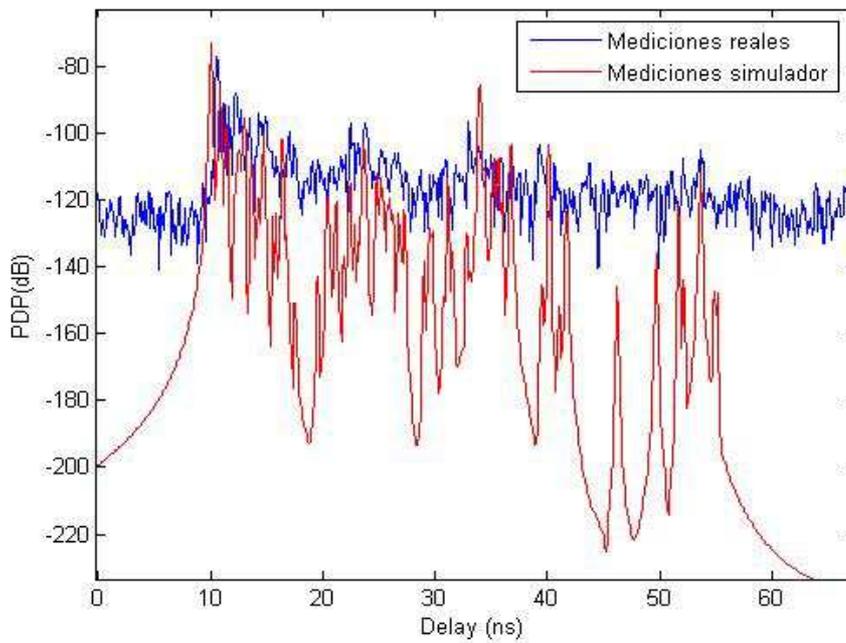


Figura 4.29. PDP para la posición 9

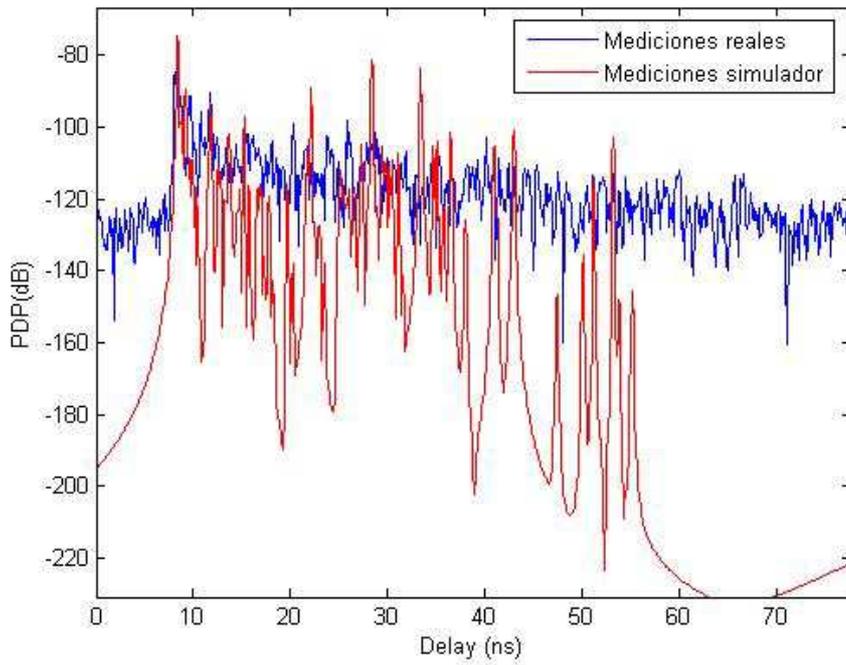


Figura 4.30. PDP para la posición 10

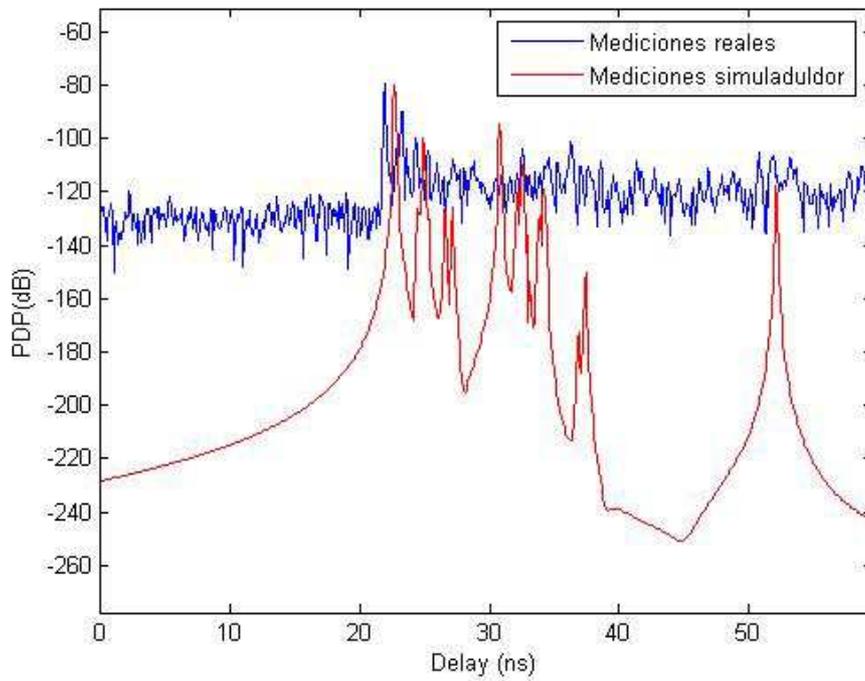


Figura 4.31. PDP para la posición 11

Las siguientes posiciones se encuentran más cerca del receptor:

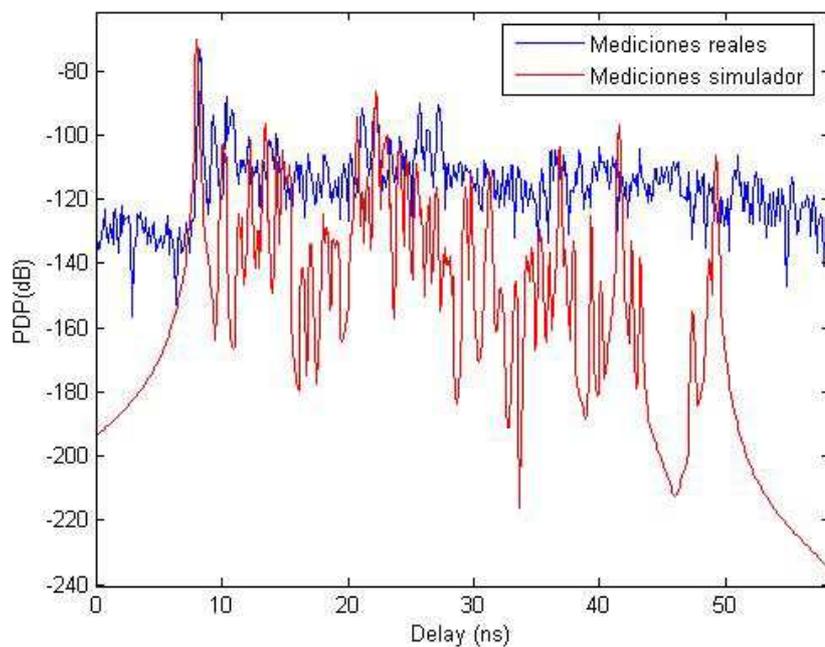


Figura 4.32. PDP para la posición 12

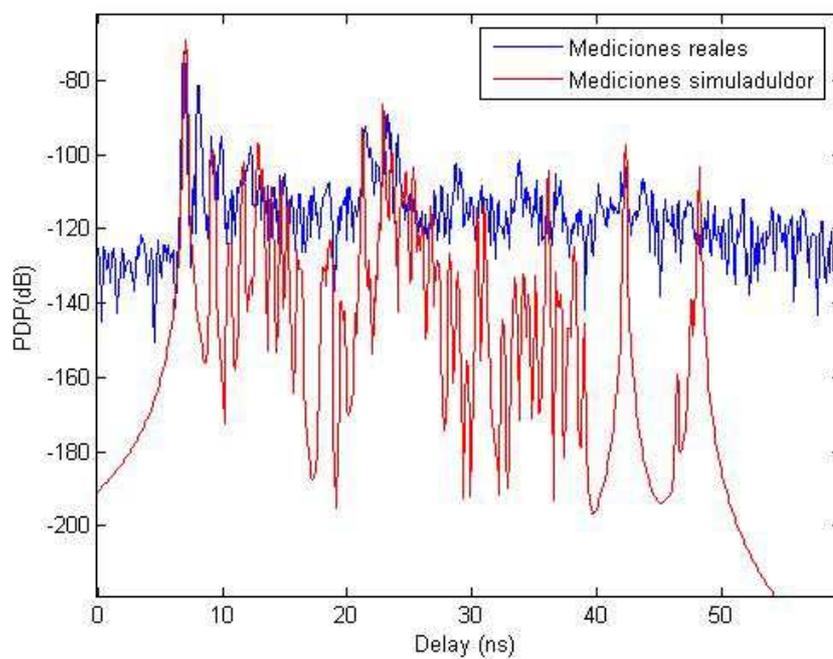


Figura 4.33. PDP para la posición 13

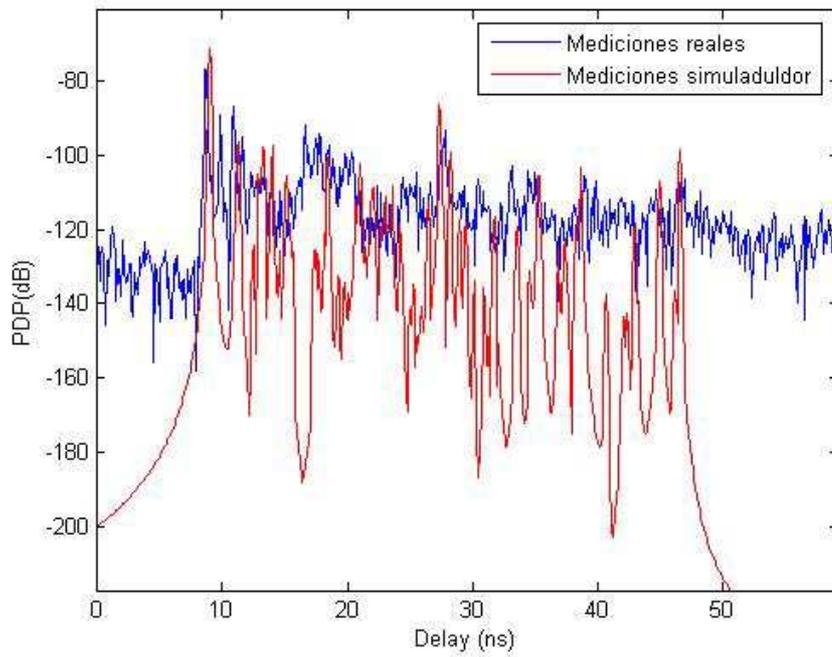


Figura 4.34. PDP para la posición 14

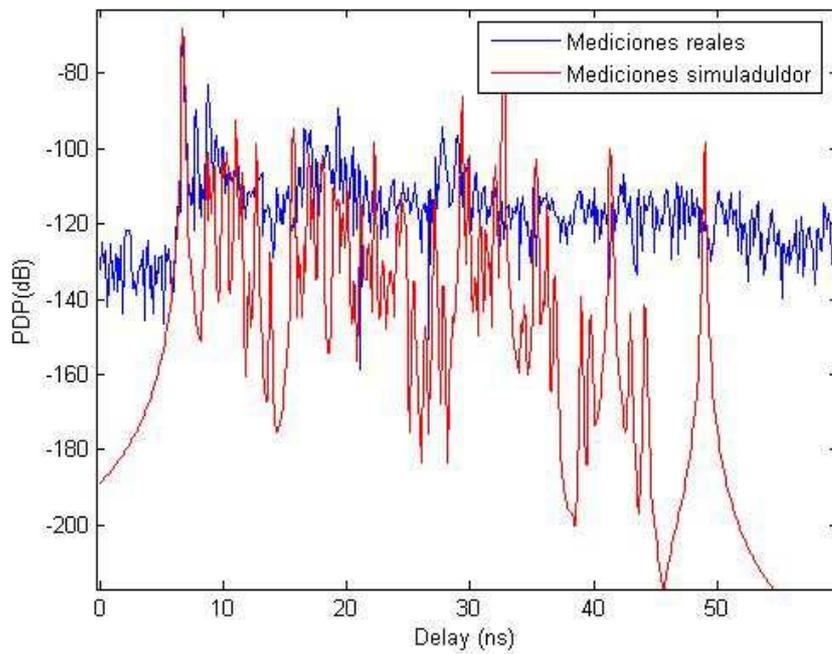


Figura 4.35. PDP para la posición 15

A partir de estos resultados se pueden obtener varias conclusiones. En primer lugar, se puede observar que los resultados de las simulaciones no son exactamente idénticos a las mediciones. Esto se puede deber a varios factores como puede ser la complejidad de una representación real del entorno del laboratorio. Existen muchos elementos que no se han modelado en el simulador y que pueden influir en la reflexión de ciertos rayos.

Todo lo mencionado anteriormente influye en mayor o menor medida en los resultados, de tal forma que la precisión del simulador a la hora de obtener el PDP no sea del 100%. Sin embargo, de los datos obtenidos en la simulación se puede observar cómo hay valores que coinciden que son importantes de reseñar. Se puede comprobar cómo el rayo directo coincide en los dos casos. Después existen rayos correspondientes a reflexiones en los objetos del laboratorio en los que la simulación muestra un gran parecido con la medida real. Si acercamos el transmisor al receptor se percibe una tendencia a una mayor precisión en los resultados, siendo estos más próximos a los reales.

Sin duda, una mayor optimización del Trazador 3D como un avance en el estudio de las características de los materiales a 60 GHz permitirá la obtención de resultados mucho más precisos.

Se han visto los resultados gráficos de las simulaciones y medidas, pero también se puede realizar un análisis cuantitativo que permita medir el grado de similitud de una forma más objetiva. Para ello obtendremos el Valor Cuadrático Medio (RMS según las siglas en inglés) para cada una de las posiciones:

	RMS Medidas reales (ns)	RMS Simulaciones (ns)	Error relativo
Posición 1	26.36	26.42	0.22%
Posición 2	26.01	26.64	2.30%
Posición 3	27.16	27.30	0.51%
Posición 4	26.12	26.60	1.82%
Posición 5	26.59	26.69	0.37%
Posición 6	25.78	26.50	2.75%
Posición 7	26.96	26.54	1.57%
Posición 8	26.35	25.37	3.79%
Posición 9	25.30	26.52	4.71%

Posición 10	27.58	27.76	0.65%
Posición 11	26.32	25.69	2.81%
Posición 12	26.56	26.39	0.64%
Posición 13	26.74	25.82	3.50%
Posición 14	25.28	29.90	16.74%
Posición 15	25.68	25.55	0.51%

Tabla 4.4. RMS obtenido para cada una de las posiciones en el Laboratorio SAIT

En este caso, tras observar los valores de la tabla, podemos ver unos resultados correspondientes a las medidas reales muy próximos a los obtenidos en las simulaciones. Únicamente la posición 14 muestra un valor muy diferente a las medidas. Una de las posibles causas serían reflexiones que se produjesen en el aparato de aire acondicionado y que en las medidas la puerta del laboratorio está abierta, y en nuestro caso la tomamos como cerrada. De esta forma queda demostrado que el Trazador 3D realiza un estudio notablemente correcta del canal. Aunque sin lugar a dudas, con un margen de mejora, tal como mencionábamos en los párrafos anteriores.

4.3.4 Cálculo del PDP en una frecuencia (60 GHz).

En el apartado anterior se obtenía el Power Delay Profile (PDP) a partir de un rango de frecuencias utilizando el mismo método empleado en las medidas reales. Existe una alternativa a dicho método, que consiste en hallar el Power Delay Profile a una única frecuencia. Se basa en representar el tiempo de retardo con el que llega cada rayo al receptor, en este caso a 60 Ghz. El número de reflexiones que emplearemos será de 3, puesto que tal como observamos en el Capítulo 3, a partir de 2 reflexiones los resultados que obteníamos de Root Mean Square eran idénticos.

En el primera posición, no se obtienen resultados similares debido a que no es una situación de LOS, existe una columna que se interpone entre el transmisor y el receptor.

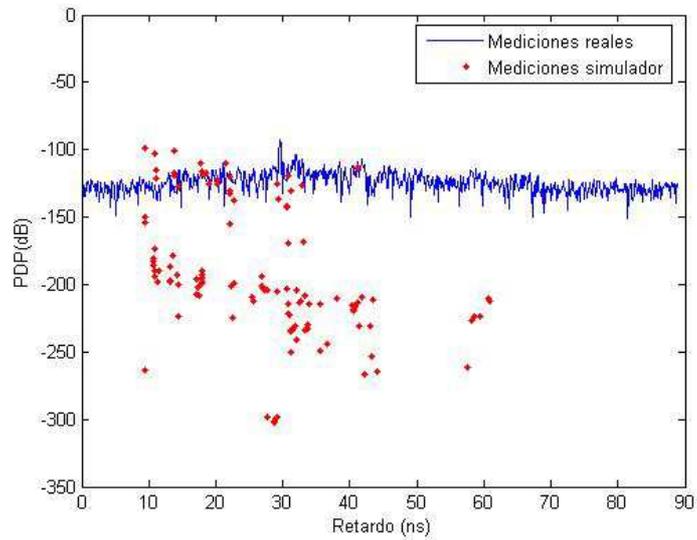


Figura 4.36. PDP para la posición 1

A continuación las posiciones situadas en la zona izquierda del receptor:

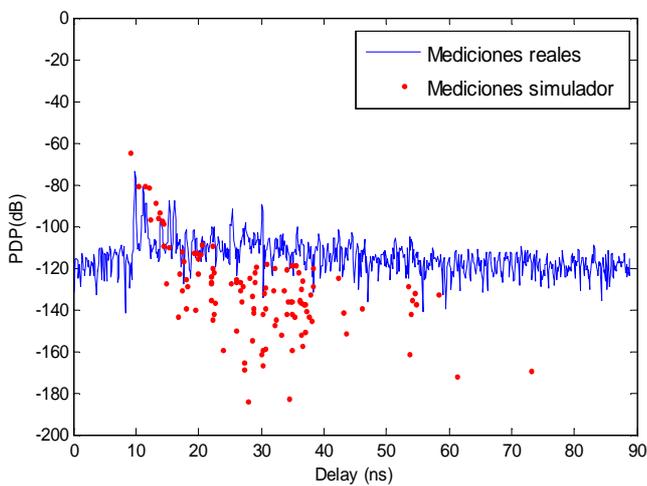


Figura 4.37. PDP para la posición 2

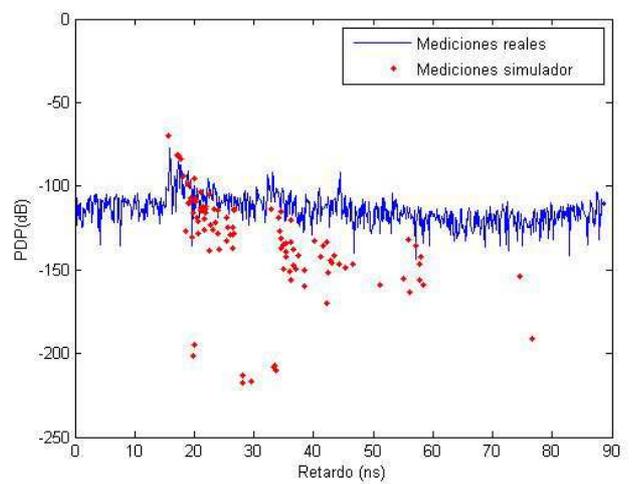


Figura 4.38. PDP para la posición 3

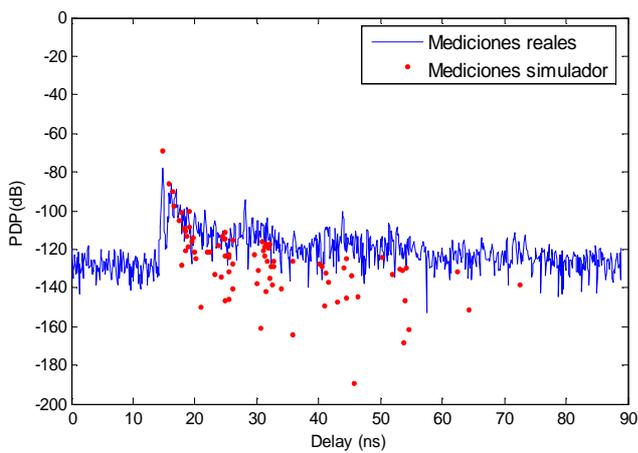


Figura 4.39. PDP para la posición 4

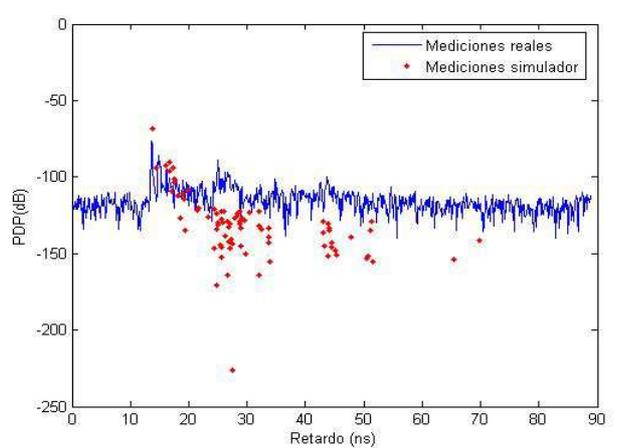


Figura 4.40. PDP para la posición 5

Para las posiciones situadas a la derecha del receptor obtenemos:

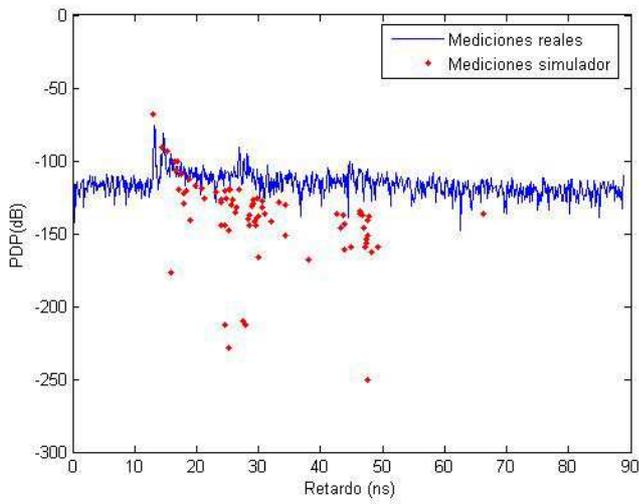


Figura 4.41. PDP para la posición 6

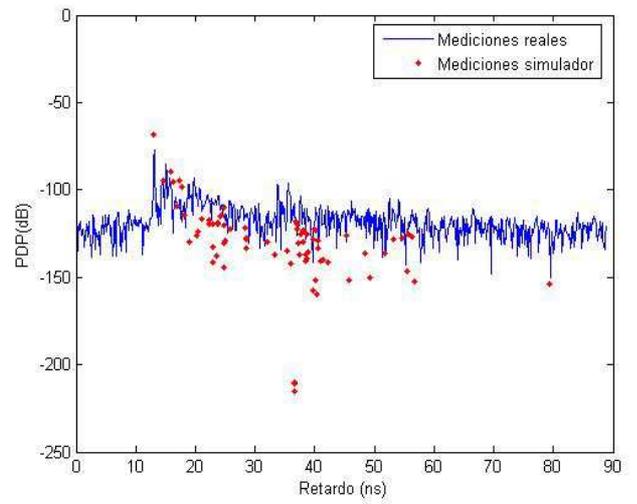


Figura 4.42. PDP para la posición 7

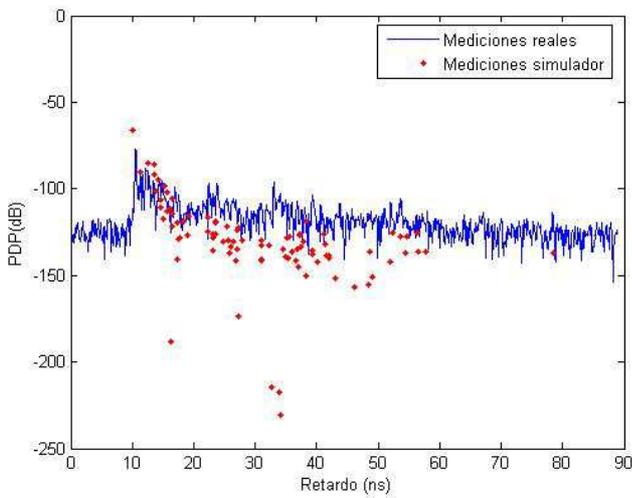


Figura 4.43. PDP para la posición 8

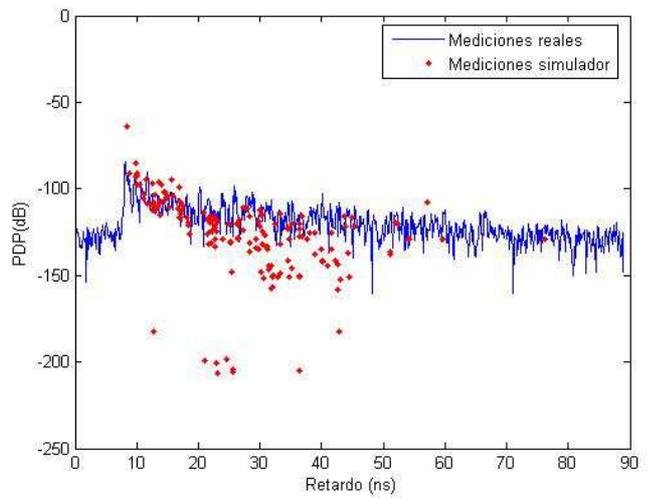


Figura 4.44. PDP para la posición 9

Finalmente los resultados de las posiciones más centradas y cercanas al receptor:

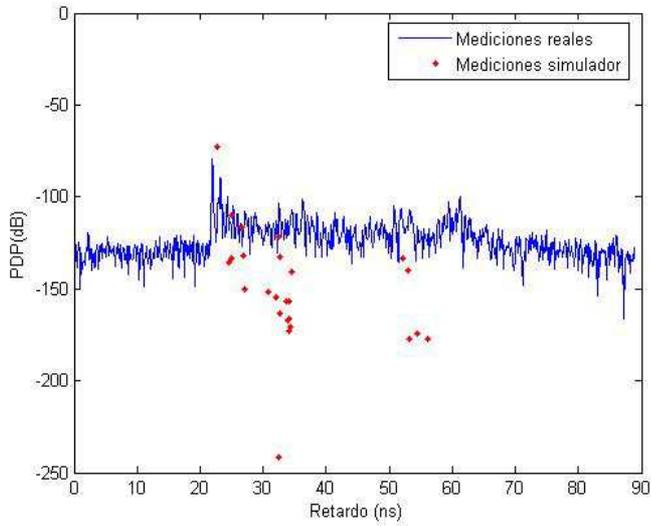


Figura 4.45. PDP para la posición 10

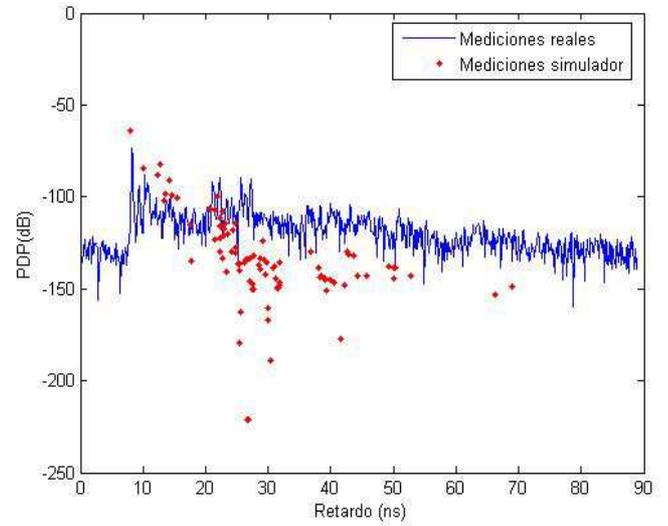


Figura 4.46. PDP para la posición 11

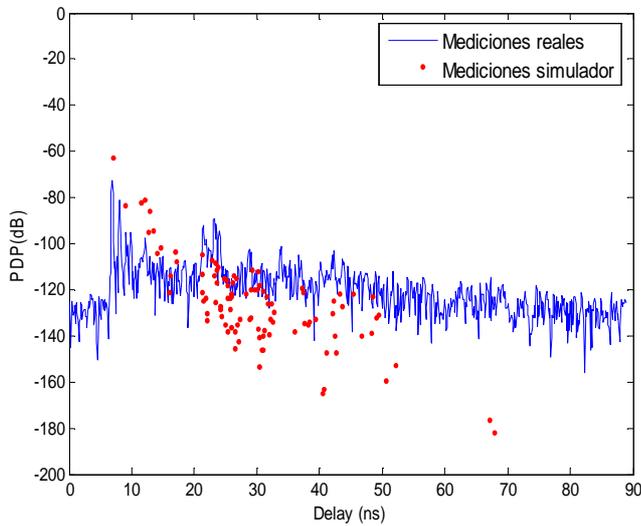


Figura 4.47. PDP para la posición 12

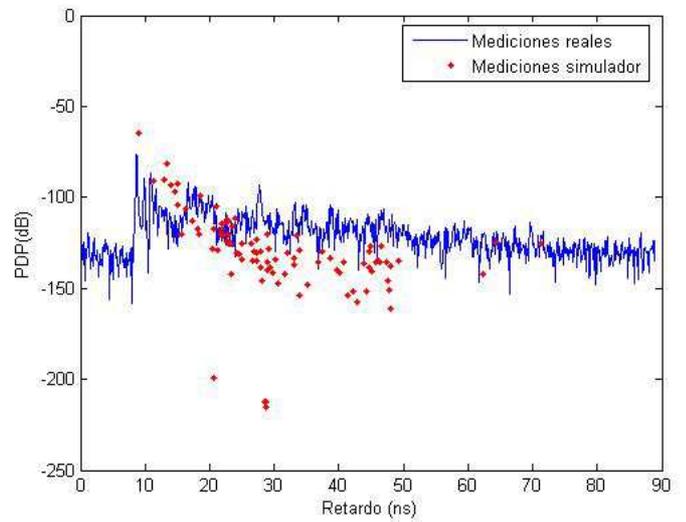


Figura 4.48. PDP para la posición 13

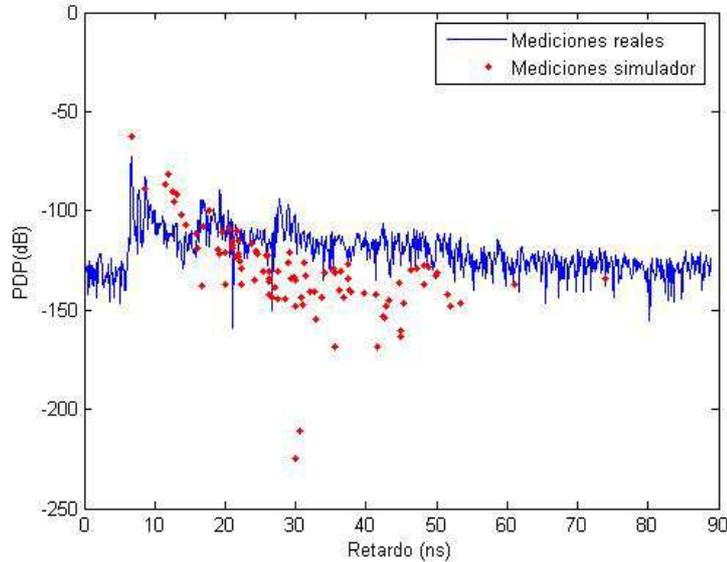


Figura 4.49. PDP para la posición 14

Tal como observamos, los resultados no son tan precisos como el método anterior. Sin embargo, podemos observar el retardo de cada rayo que llega al receptor. Esto nos permite realizar un análisis de los principales rayos que se reciben y compararlos con los de las medidas reales. Esto se estudiará con más detalle en el siguiente apartado.

De forma excepcional, se puede analizar como influirían en los resultados la eliminación del techo y el suelo en nuestro simulador. Con esta operación se desea comprobar si las contribuciones que aparecen después del rayo directo desaparecen. Es decir, en nuestras simulaciones aparecen unas contribuciones con mucha potencia después del rayo directo y en las medidas no. Una de las posibles razones sería que el diagrama de radiación de la antena atenúa las reflexiones en el suelo y el techo.

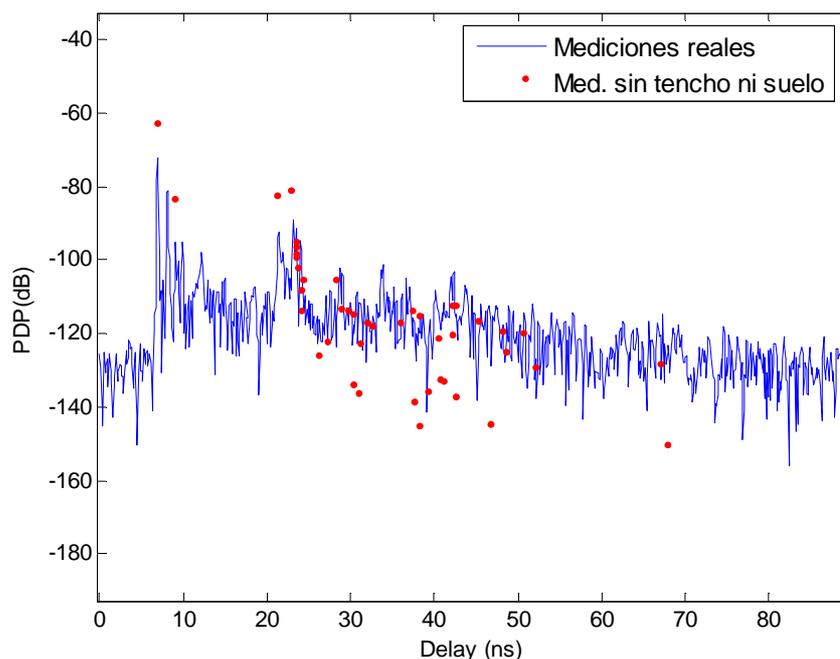


Figura 4.50. PDP de la posición 13 sin techo ni suelo

Como se puede apreciar efectivamente las contribuciones que aparecían después del rayo directo han desaparecido.

4.3.5 Estudio de las contribuciones mediante imágenes.

En este apartado, se analizarán las contribuciones más importantes que llegan al receptor tanto para las medidas reales como para los resultados obtenidos por el Trazador 3D. Con ello se podrá observar nuevamente el nivel de eficiencia que tiene el simulador con respecto a las medidas.

Este análisis consiste en obtener el retardo de los principales rayos que llegan al receptor y obtener mediante el método de las imágenes la trayectoria aproximada que seguirían. En el caso de las medidas y tras obtener dicho retardo, se dibujará sobre el plano del laboratorio SAIT la trayectoria seguida por los rayos a partir del método de las imágenes. Tras ello, buscamos el rayo obtenido con el Trazador 3D que más se parece al rayo dibujado (obtenido con el método de las imágenes a partir del retador de la medida). En este último, los rayos se obtendrán de manera gráfica y directamente mediante el simulador. A partir de aquí, compararemos si en ambos casos las trayectorias de los rayos

obtenidos son idénticas y con ello una nueva herramienta para comparar el grado de eficiencia de nuestro simulador.

Se analizarán con detenimiento 5 posiciones:

Posición 2.

En primer lugar se seleccionarán las componentes más significativas:

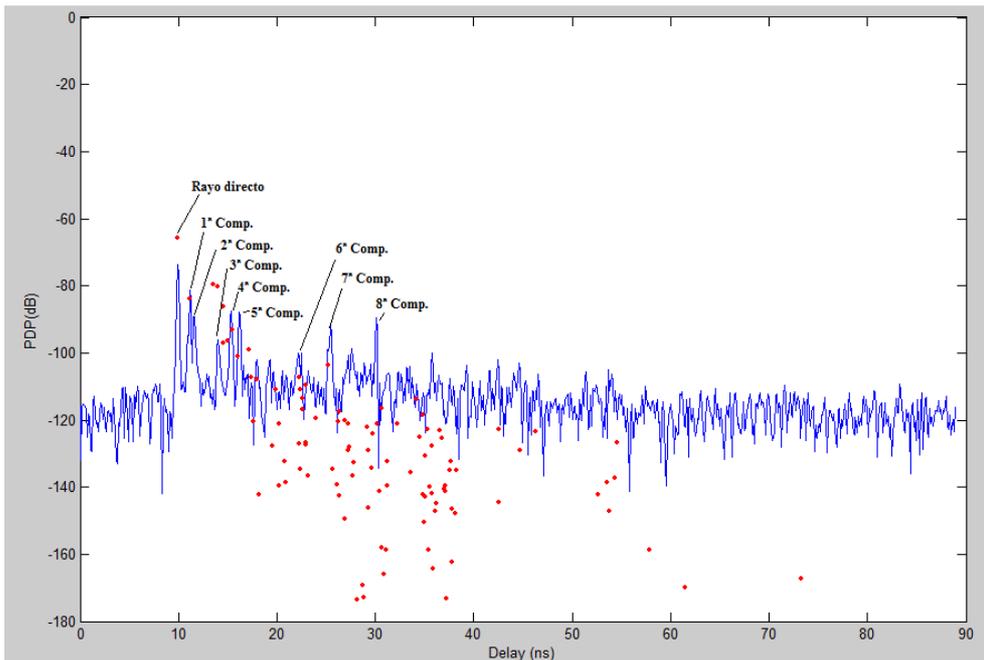


Figura 4.51. Componentes más significativas de la posición 2

	Distancia (m)	Tiempo (ns)
Rayo directo	2.96	9.89
1ª Componente	3.33	11.11
2ª Componente	3.47	11.56
3ª Componente	3.87	12.89
4ª Componente	4.2	14.01
5ª Componente	4.6	15.33
6ª Componente	4.83	16.11
7ª Componente	7.63	25.44
8ª Componente	9.03	30.11

Tabla 4.5. Retardo medio de las medidas de las componentes para la posición 2

La primera y segunda componente se deben a las reflexiones que se producen en la pared que se encuentra detrás del receptor.

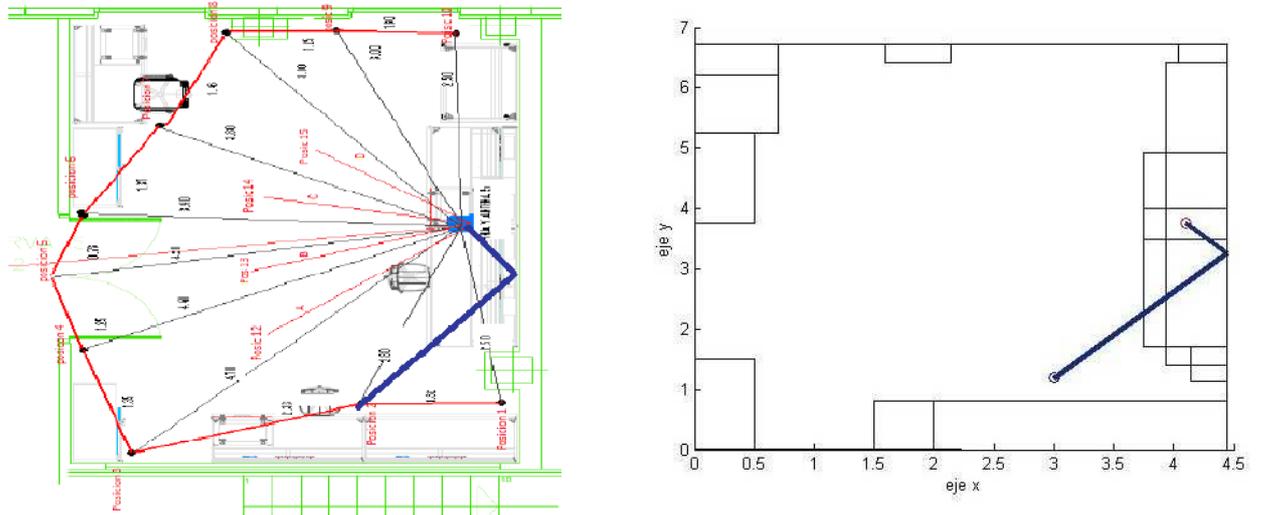


Figura 4.52. Trayectoria de la primera componente para la posición 2

La figura de la izquierda se trata del rayo dibujado a partir de las mediciones obtenidas en el Laboratorio de medidas del I+D+I , y la de la derecha es la gráfica obtenida por el trazador. Para las siguientes imágenes se seguirá el mismo orden.

La cuarta, se debe a la reflexión en la siguiente pared:

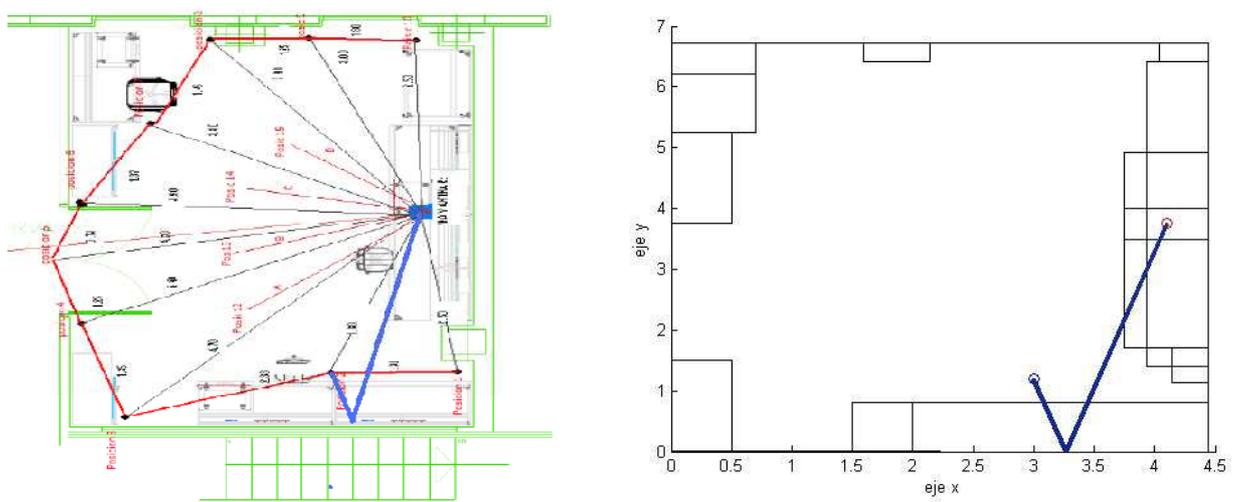


Figura 4.53. Trayectoria de la cuarta componente para la posición 2

La quinta y sexta componente se deben a reflexiones dobles que se producen:

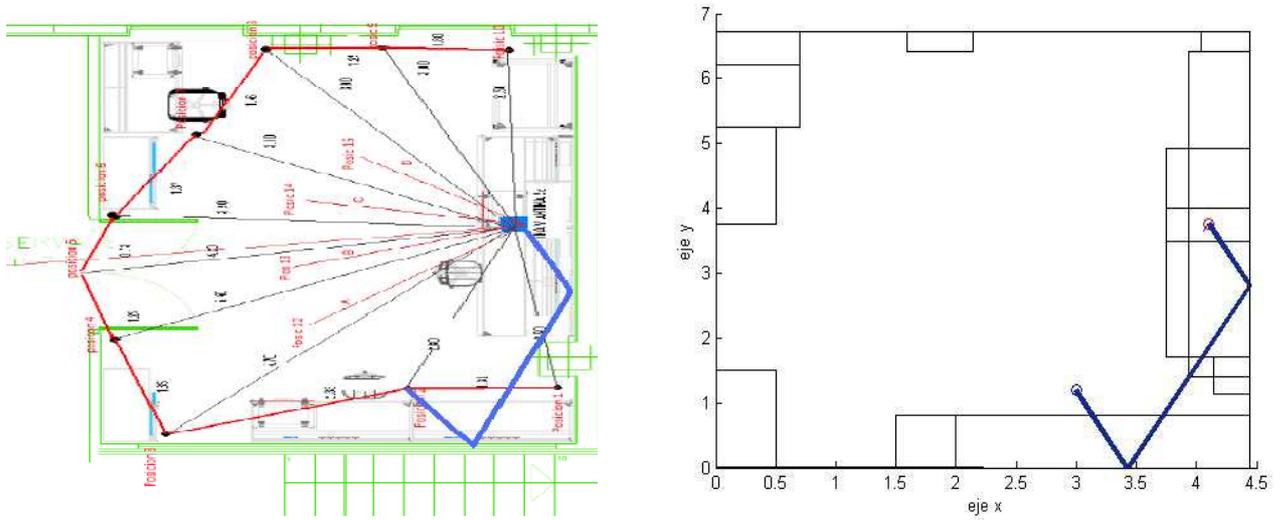


Figura 4.54. Trayectoria de la quinta y sexta componente para la posición 2

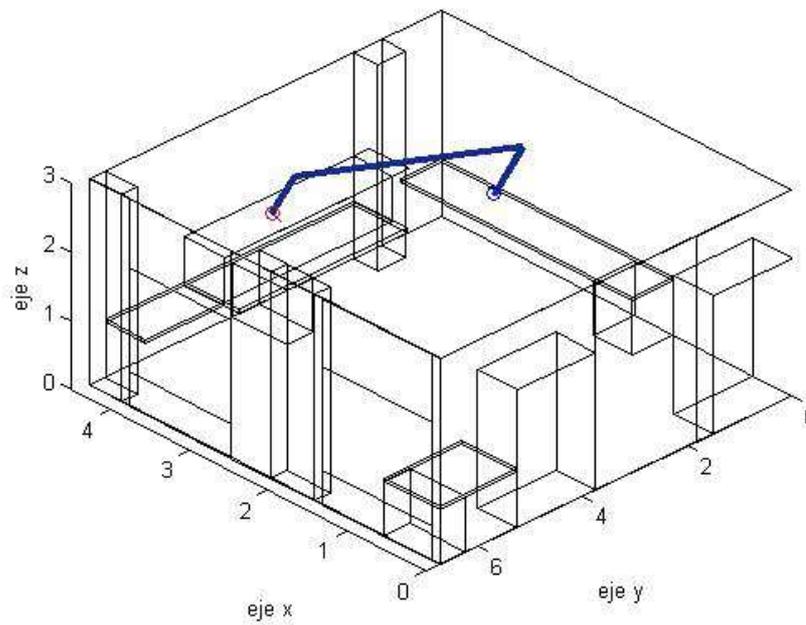


Figura 4.55. Trayectoria de la quinta componente para la posición 2 en 3D

La séptima componente:

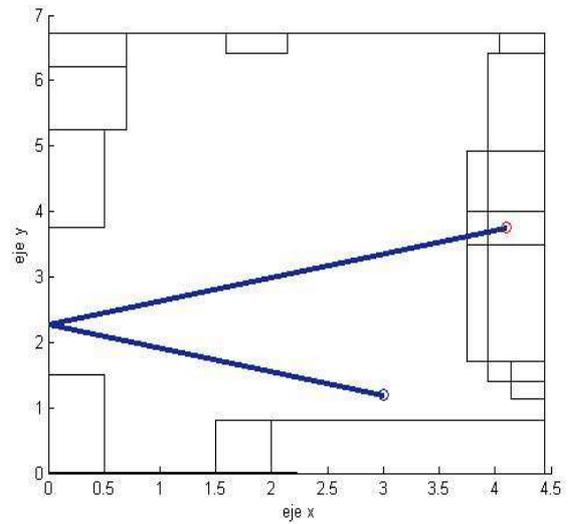
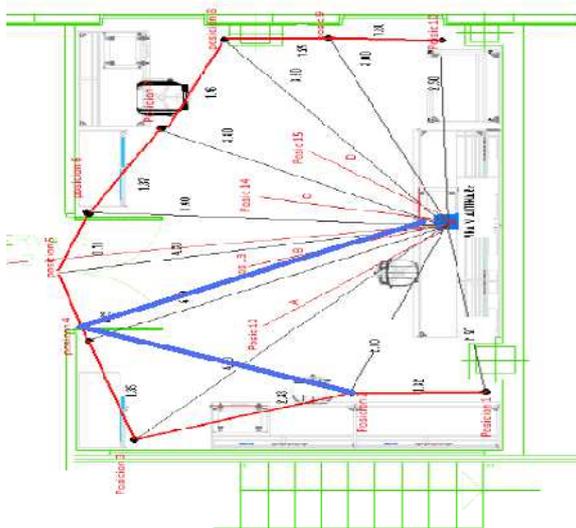


Figura 4.56. Trayectoria de la séptima componente para la posición 2

La octava componente:

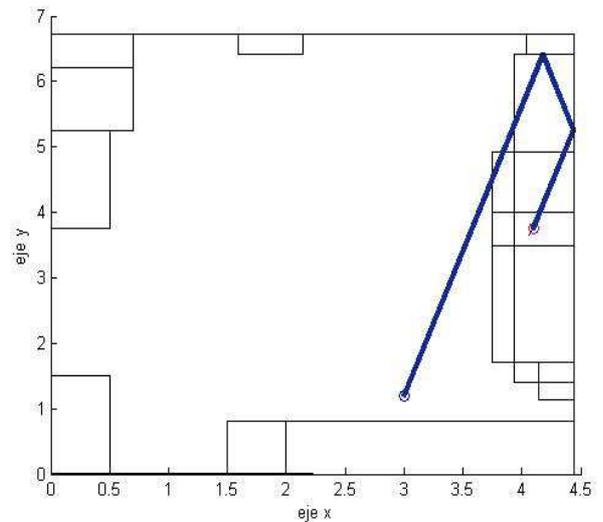
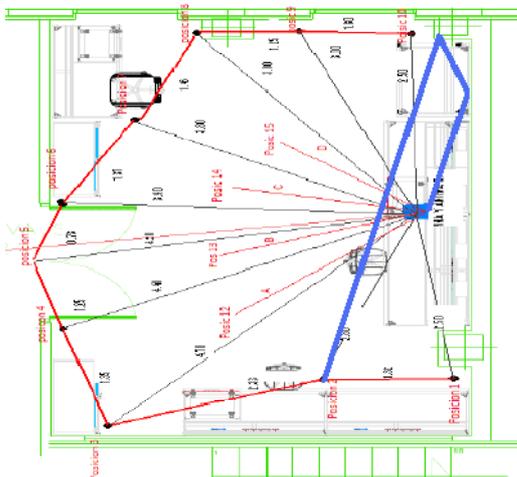


Figura 4.57. Trayectoria de la octava componente para la posición 2

Tal como se puede observar, los rayos obtenidos por el método de las imágenes a partir de las medidas coinciden totalmente con los rayos obtenidos gráficamente por el simulador. Las principales componentes que se detectaron en las mediciones reales se puede ver que siguen la misma trayectoria que en el simulador. Este es un dato que ejemplifica la gran precisión del simulador.

Posición 3.

Empleando el mismo método que en la posición 2, se analizarán el resto de posiciones de interés.

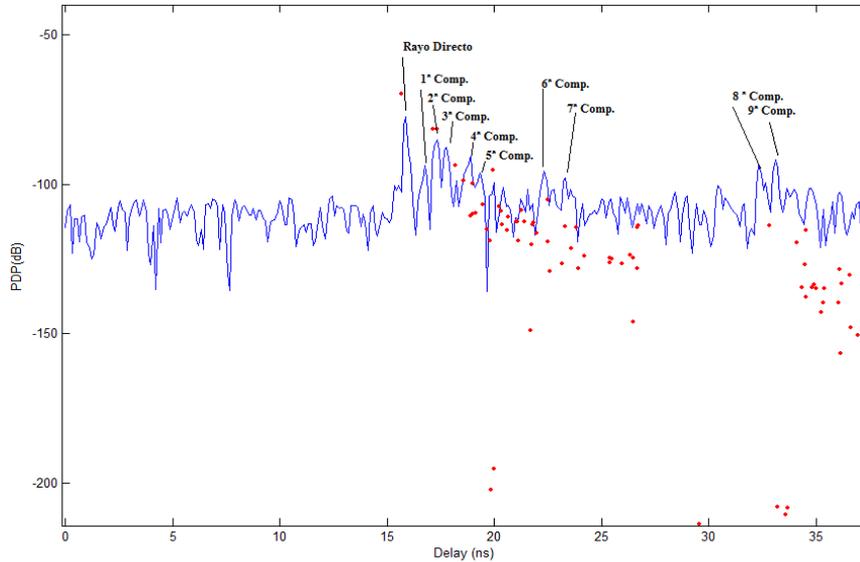


Figura 4.58. Componentes más significativas de la posición 3

	Distancia (m)	Tiempo (ns)
Rayo directo	4.76	15.89
1ª Componente	5.03	16.78
2ª Componente	5.20	17.33
3ª Componente	5.33	17.78
4ª Componente	5.66	18.89
5ª Componente	5.80	19.33
6ª Componente	6.69	22.33
7ª Componente	7.01	23.33
8ª Componente	9.70	32.34
9ª Componente	9.93	33.11

Tabla 4.6. Retardo medio de las medidas de las componentes para la posición 3

Las primeras cinco componentes se deben a reflexiones que se producen en las paredes y muebles detrás de las antenas:

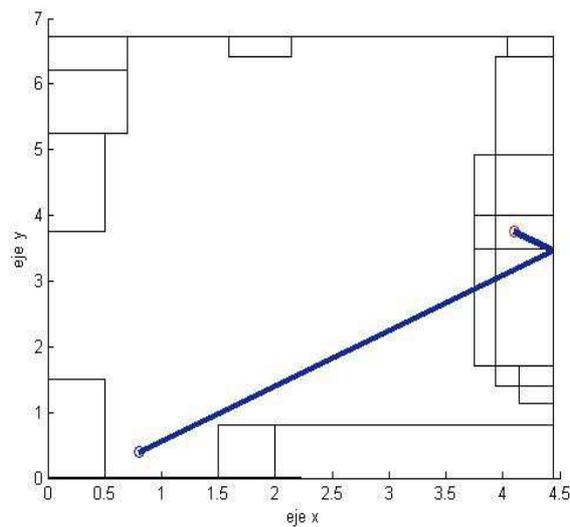
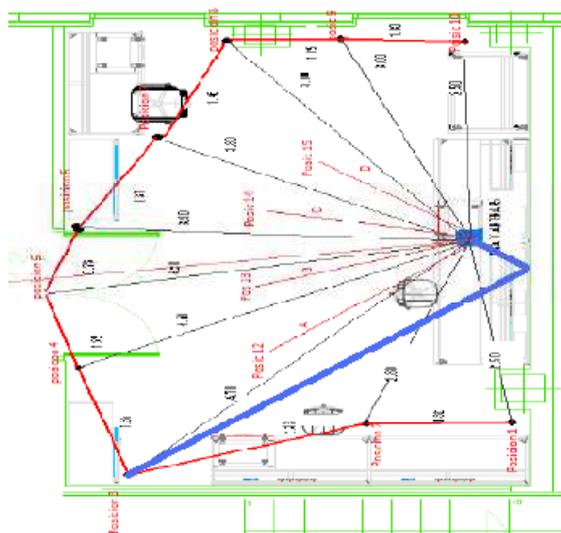


Figura 4.59. Trayectoria de la primera componente para la posición 3

La sexta componente:

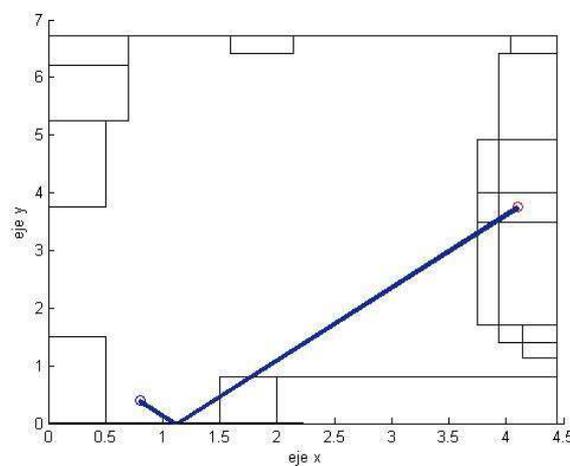
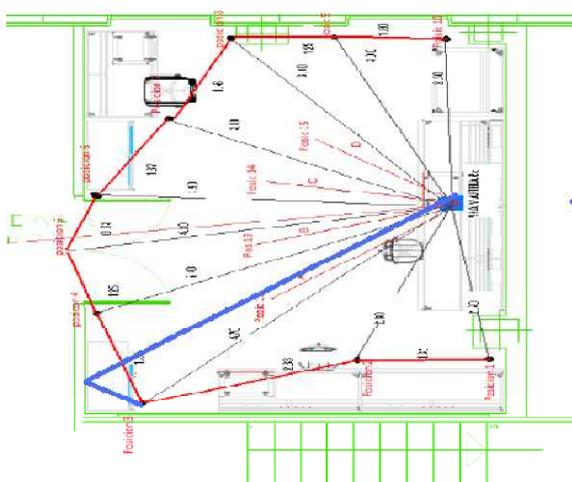


Figura 4.60. Trayectoria de la sexta componente para la posición 3

Para esta componente no se obtiene una misma trayectoria. Esto se debe a que el retardo en ambos casos es prácticamente idéntico, por lo que a la hora de establecer cuál es la trayectoria correcta pueden aparecer estas discordancias.

La séptima componente:

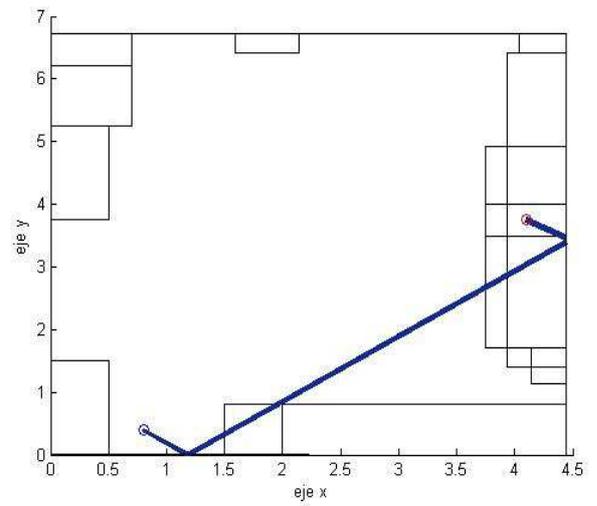
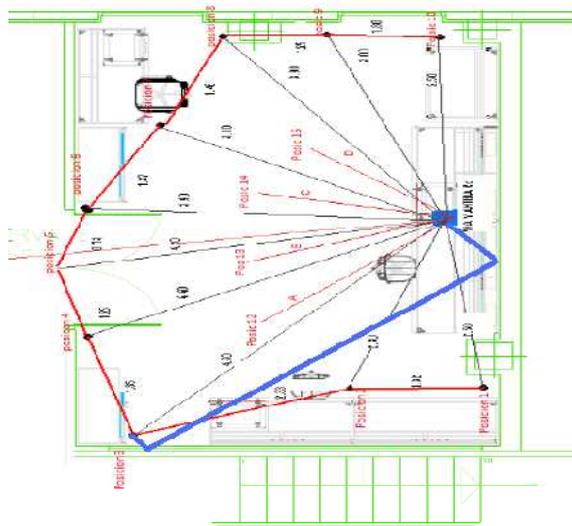


Figura 4.61. Trayectoria de la séptima componente para la posición 3

Por último la octava y novena componente se pueden deber a una reflexión en la siguiente pared:

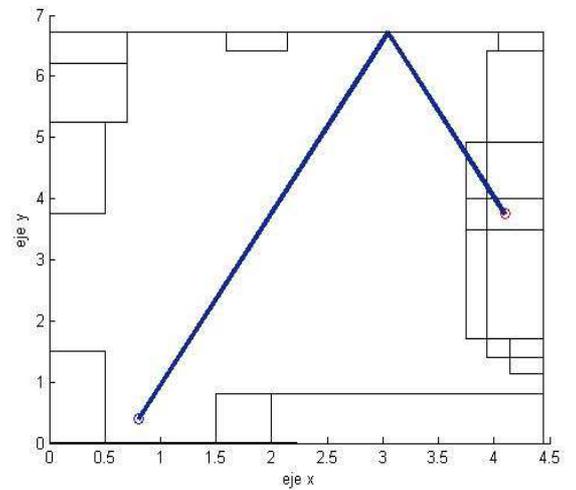
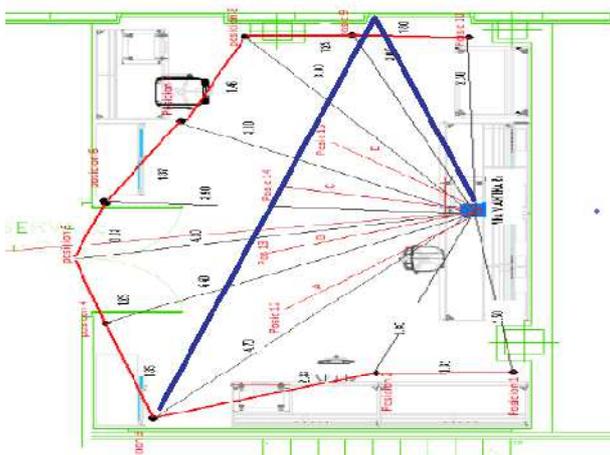


Figura 4.62. Trayectoria de la octava y novena componente para la posición 3

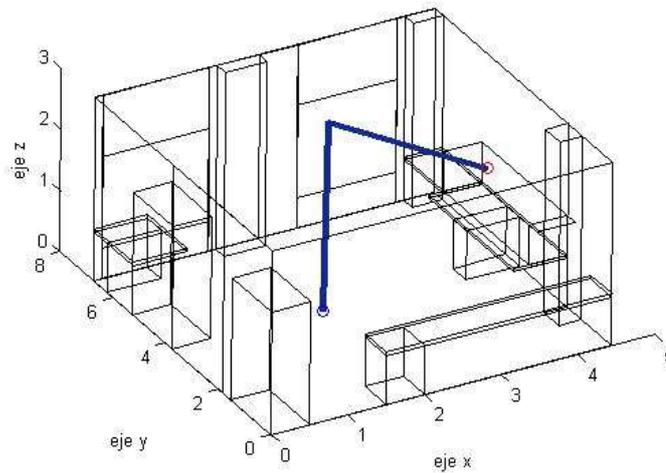


Figura 4.63. Trayectoria de la octava y novena componente para la posición 3 en 3D

Al dar en la ventana, esto puede provocar que haya elementos de dicha ventana que provoquen más reflexiones. En el simulador a la hora de establecer la complejidad de la estructura hay que encontrar un compromiso precisión – tiempo de simulación. Por ello no se puede representar algunos elementos, en este caso la ventana, de una forma idéntica a la real sin que los tiempos de simulación sean excesivos.

Posición 7.

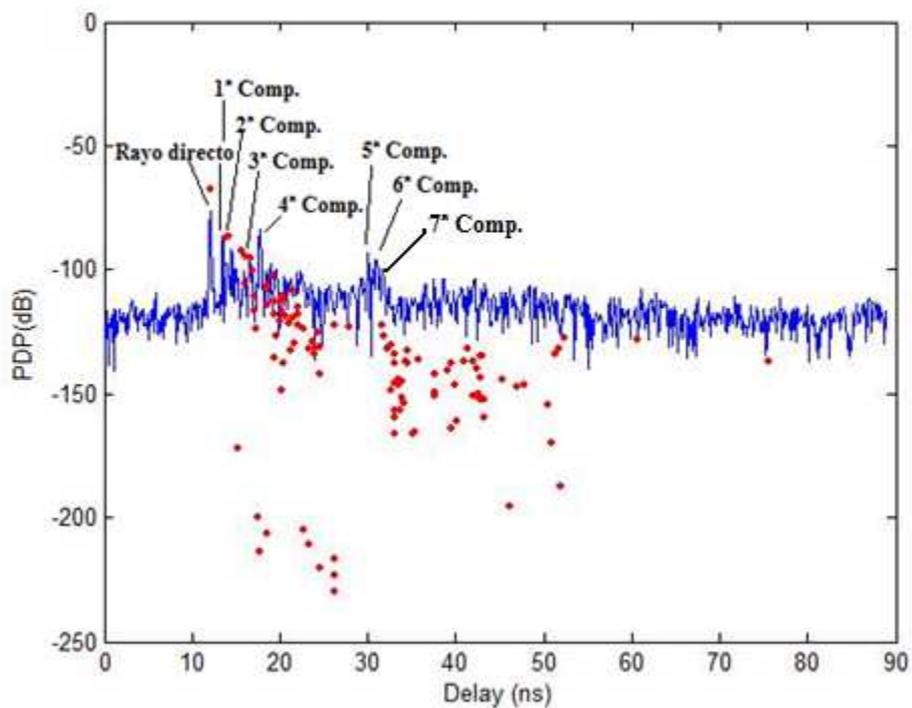


Figura 4.64. Componentes más significativas de la posición 7

	Distancia (m)	Tiempo (ns)
Rayo directo	3.63	12.11
1ª Componente	4.07	13.56
2ª Componente	4.33	14.44
3ª Componente	4.97	16.56
4ª Componente	5.30	17.67
5ª Componente	5.67	18.89
6ª Componente	8.97	29.89
7ª Componente	9.27	30.89

Tabla 4.7. Retardo medio de las medidas de las componentes para la posición 7

La primera componente se puede deber a la reflexión en la pared detrás de la antena receptora. La segunda puede aparecer por reflexiones en la misma pared más algún mueble de esa pared.

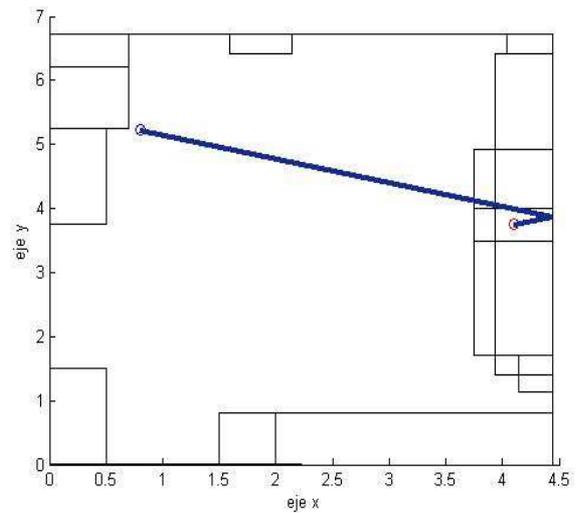
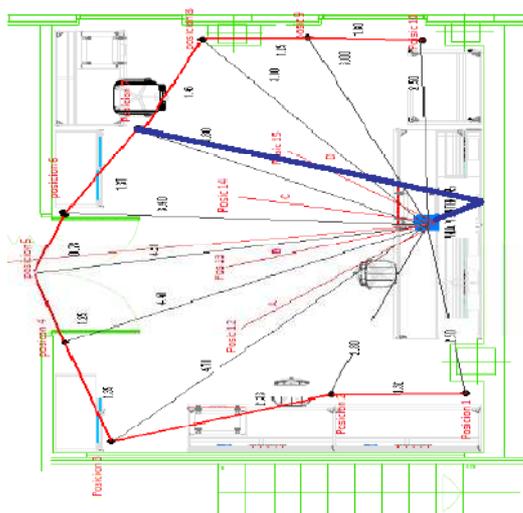


Figura 4.65. Trayectoria de la primera componente para la posición 7

La tercera componente:

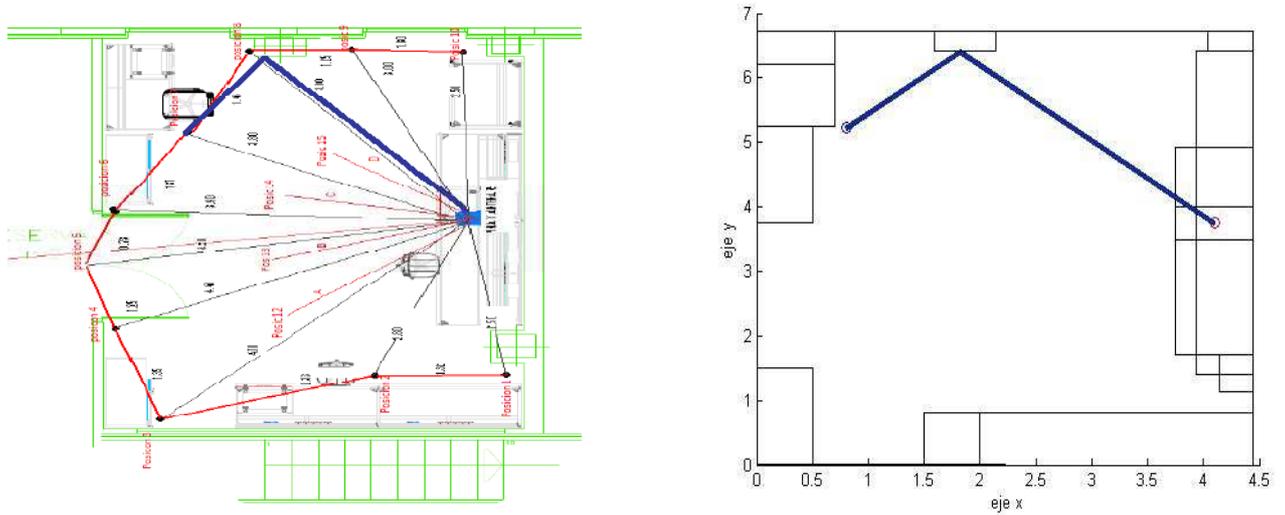


Figura 4.66. Trayectoria de la tercera componente para la posición 7

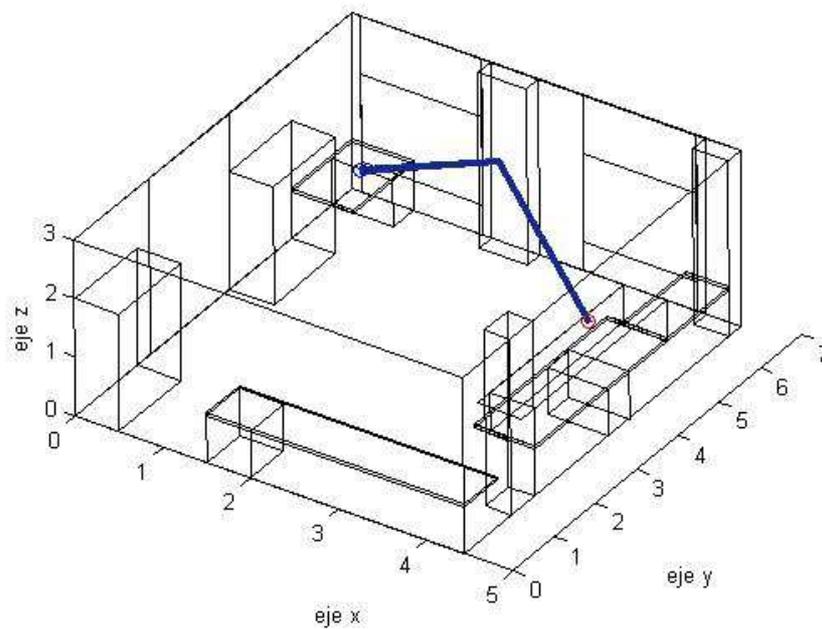


Figura 4.67. Trayectoria de la tercera componente para la posición 7 en 3D

El caso de esta componente es de especial interés pues se observa cómo influye la precisión, es decir el parecido con respecto al entorno real, de la estructura utilizada en la simulación. En la trayectoria tanto de las medidas como del Trazador 3D se ve como el rayo incide en la columna que está junto a la ventana. En caso de no haber representado dicha columna, los resultados obtenidos hubieran sido distintos.

La cuarta componente:

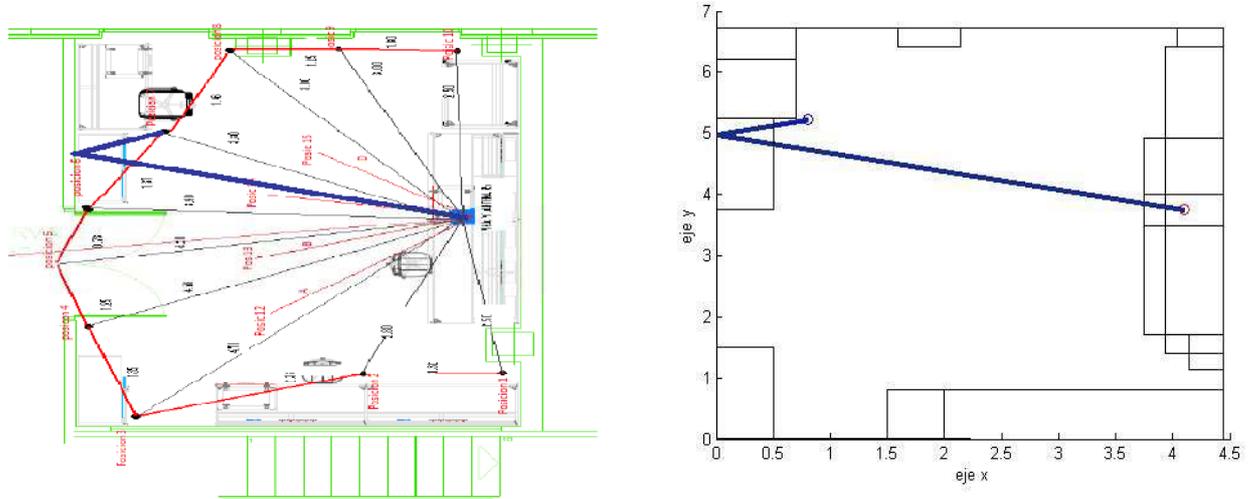


Figura 4.68. Trayectoria de la cuarta componente para la posición 7

La quinta componte puede deberse a la reflexión en la misma pared que en la anterior junto a posteriores reflexiones en los armarios de dicha pared.

La sexta componente:

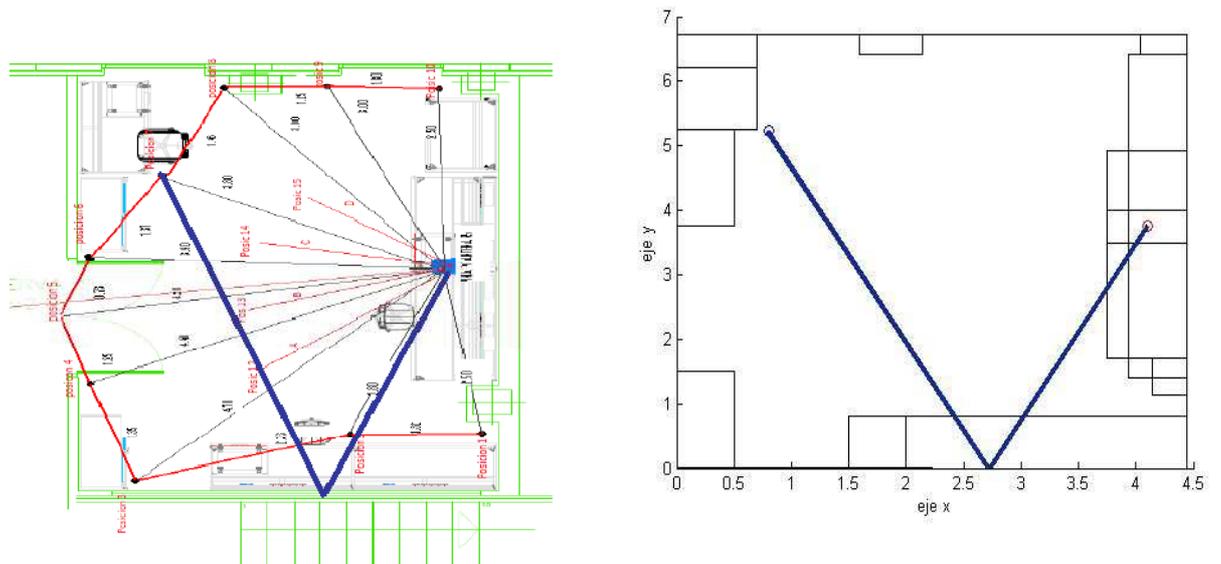


Figura 4.69. Trayectoria de la sexta componente para la posición 7

La séptima componente puede deberse a la reflexión en la misma pared que en la anterior junto a posteriores reflexiones en los armarios de dicha pared.

Posición 13.

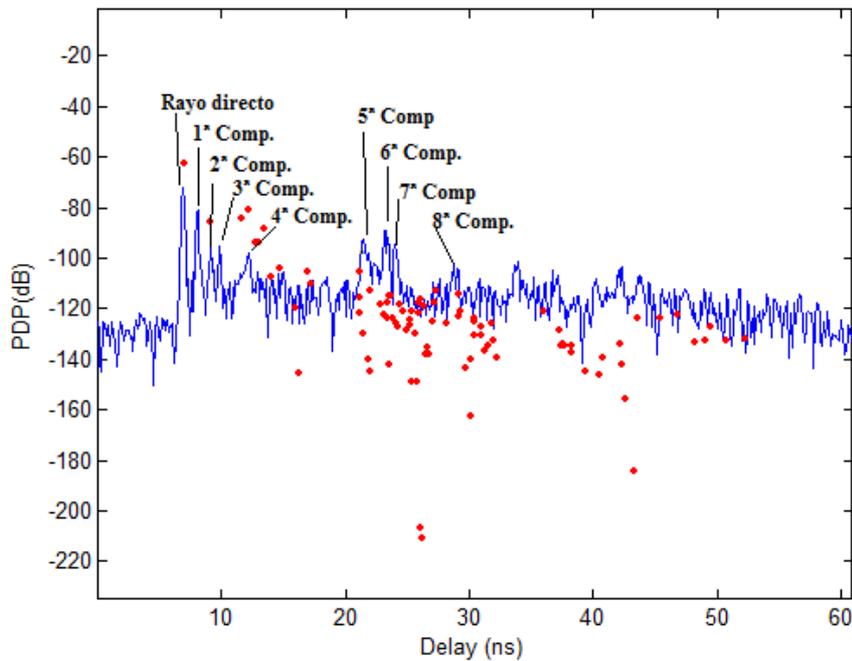


Figura 4.70. Componentes más significativas de la posición 13

	Distancia (m)	Tiempo (ns)
Rayo directo	2.06	6.89
1ª Componente	2.43	8.11
2ª Componente	2.73	9.11
3ª Componente	2.97	9.88
4ª Componente	3.66	12.22
5ª Componente	6.36	21.23
6ª Componente	6.96	23.27
7ª Componente	7.20	24.01
8ª Componente	8.62	28.73

Tabla 4.8. Retardo de las componentes para la posición 13

La 1ª Componente se corresponde con la reflexión que se produce en la pared detrás del receptor. Las siguientes tres componentes se deben a distintas reflexiones que se producen en dicha pared y los muebles cercanos a la antena.

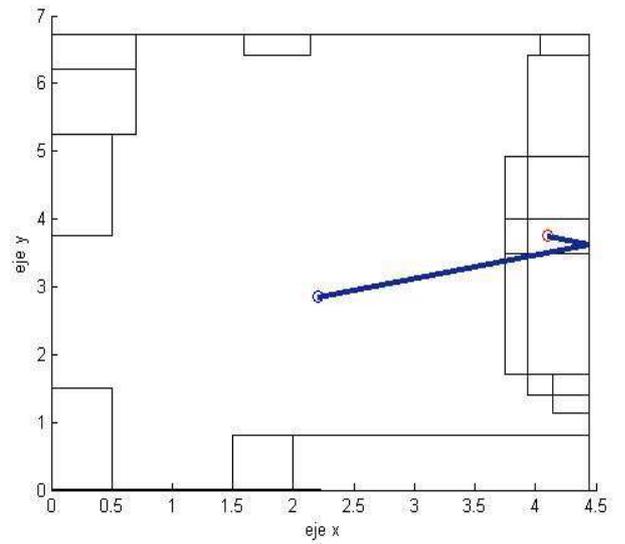
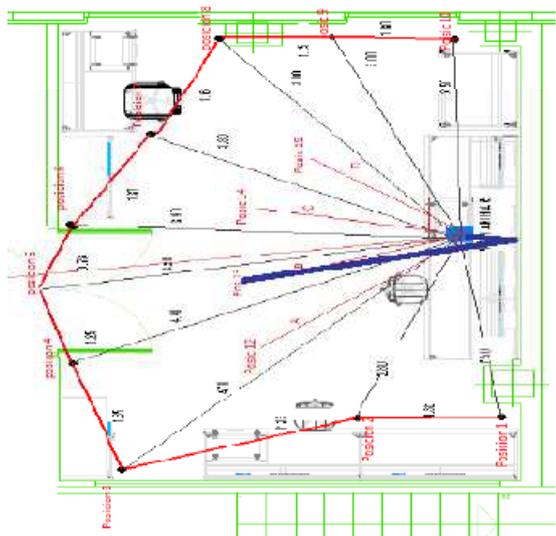


Figura 4.71. Trayectoria de la primera componente para la posición 13

La quinta componente:

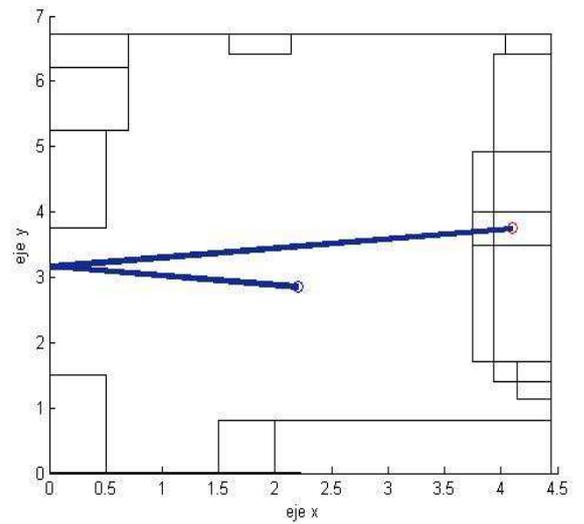
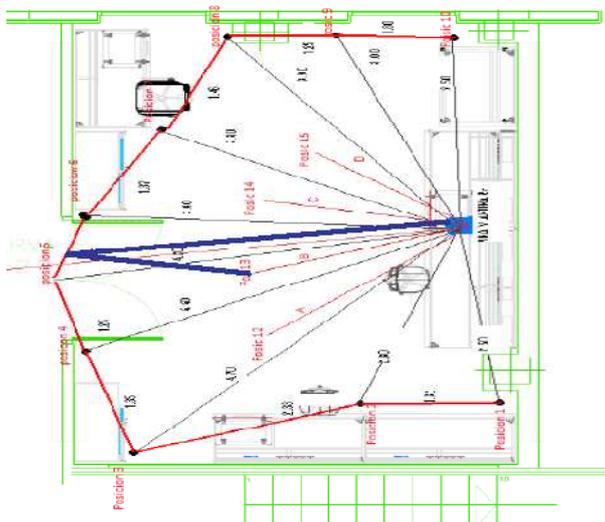


Figura 4.72. Trayectoria de la quinta componente para la posición 13

La sexta componente:

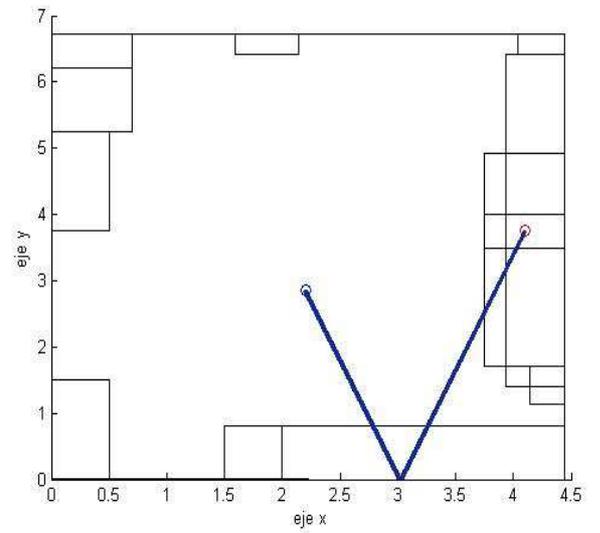
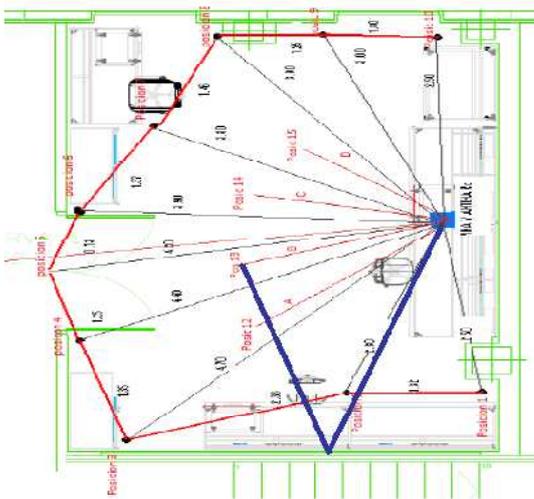


Figura 4.73. Trayectoria de la sexta componente para la posición 13

La séptima componente:

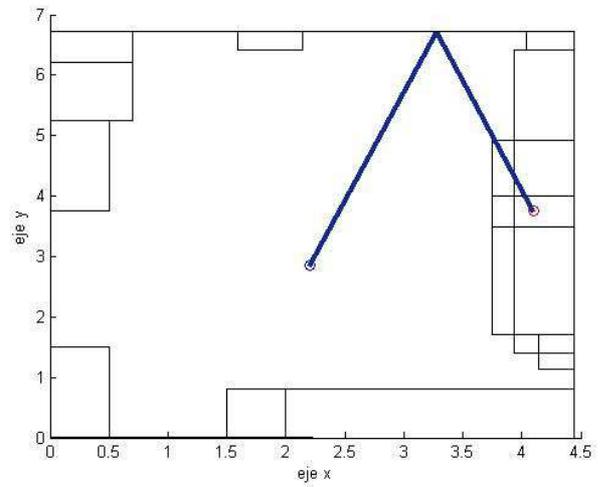
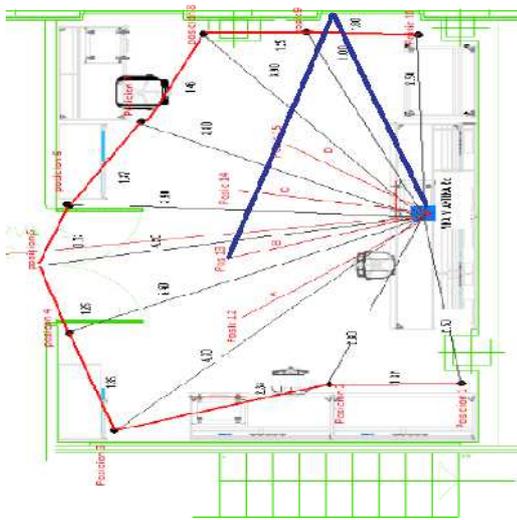


Figura 4.74. Trayectoria de la séptima componente para la posición 13

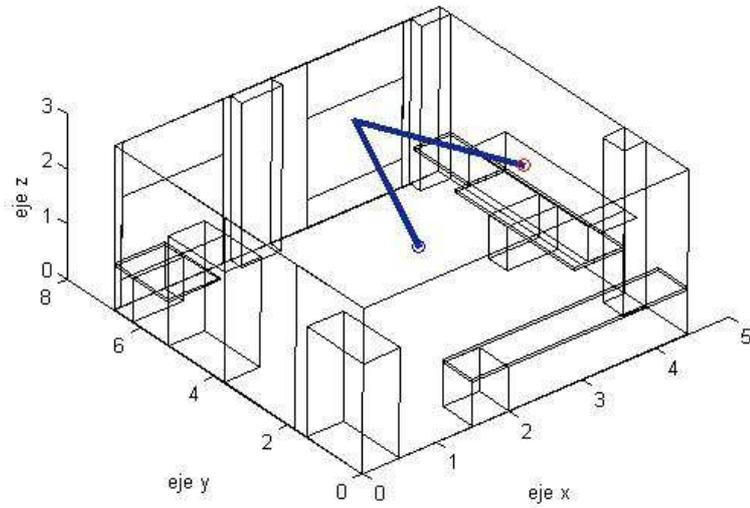


Figura 4.75. Trayectoria de la séptima componente para la posición 13 en 3D

La octava componente aproximadamente seguiría el siguiente recorrido:

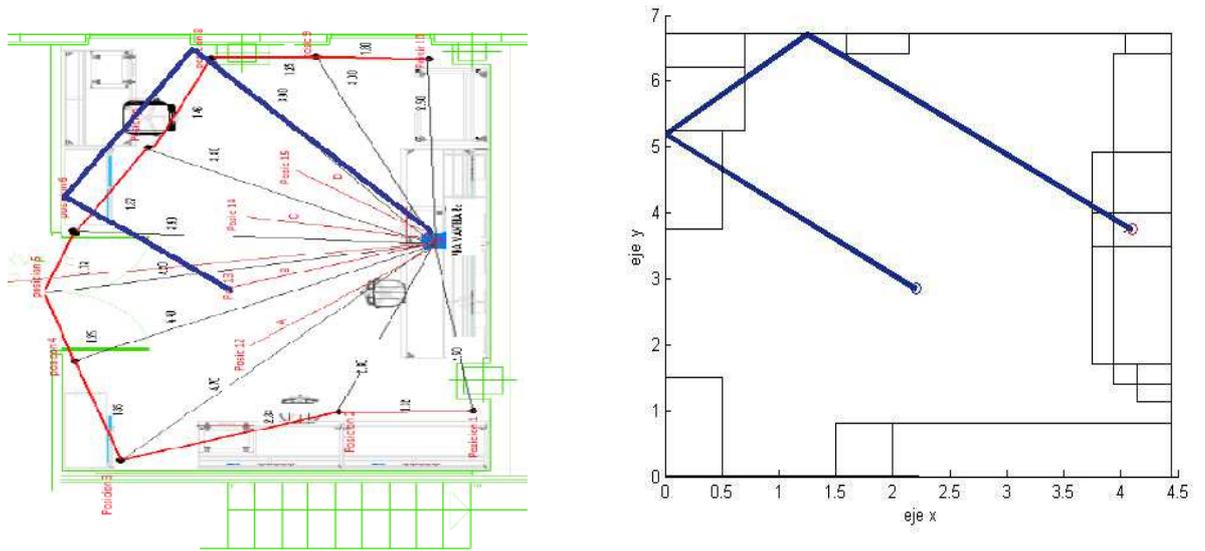


Figura 4.76. Trayectoria de la octava componente para la posición 13

Posición 14.

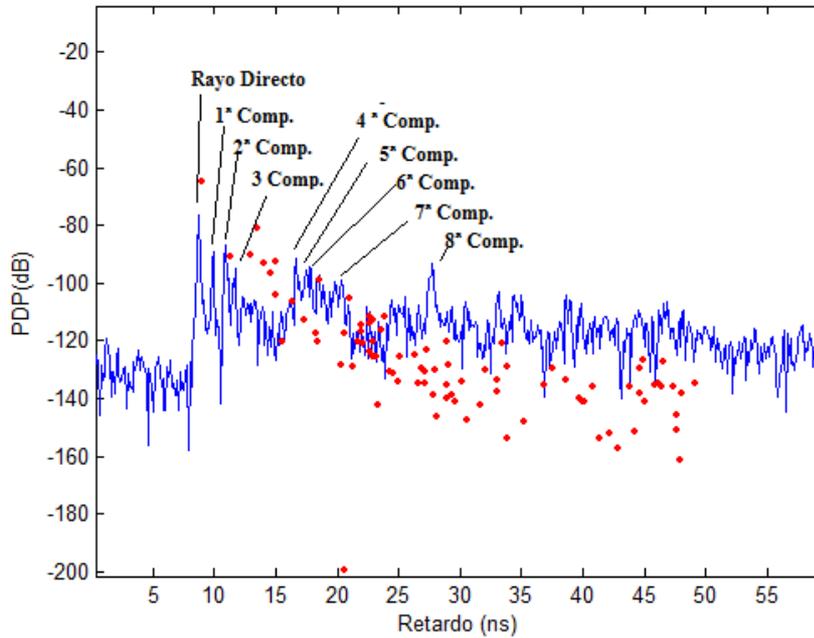


Figura 4.77. Componentes más significativas de la posición 14

	Distancia (m)	Tiempo (ns)
Rayo directo	2.60	8.67
1ª Componente	2.96	9.89
2ª Componente	3.27	10.89
3ª Componente	3.50	11.67
4ª Componente	5.01	16.67
5ª Componente	5.23	17.44
6ª Componente	5.33	17.78
7ª Componente	6.38	21.26
8ª Componente	8.33	27.77

Tabla 4.9. Retardo medio de las medidas de las componentes para la posición 14

La 1ª Componente se corresponde con la reflexión que se produce en la pared detrás del receptor. Las siguientes tres componentes se deben a distintas reflexiones que se producen en dicha pared y los muebles cercanos a la antena:

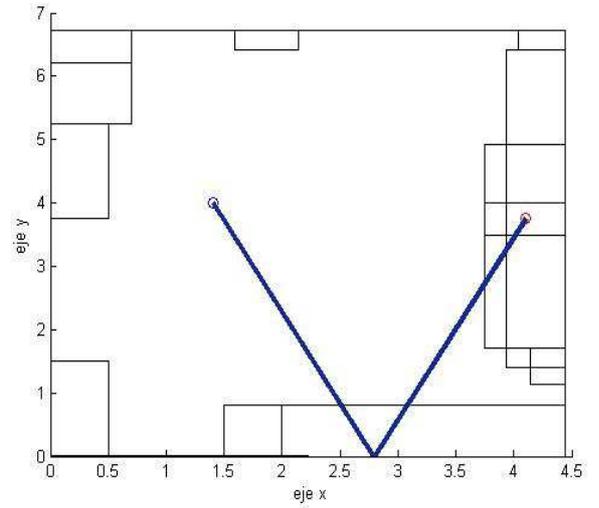
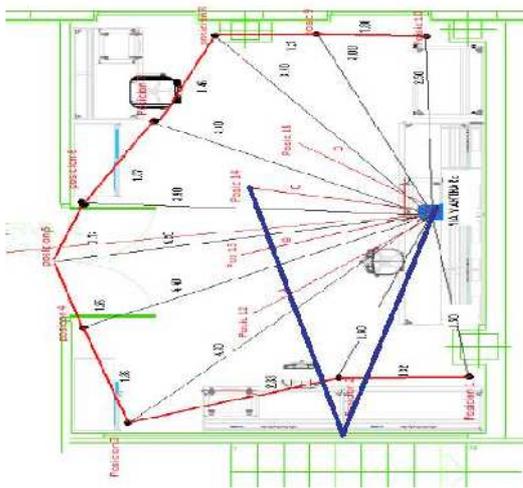


Figura 4.80. Trayectoria de la sexta componente para la posición 14

Para la séptima componente tenemos:

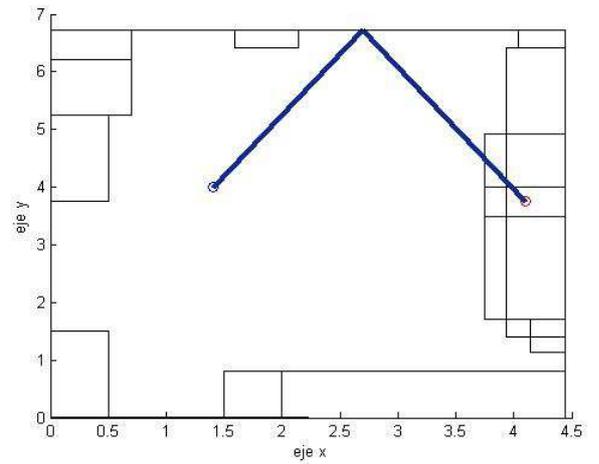
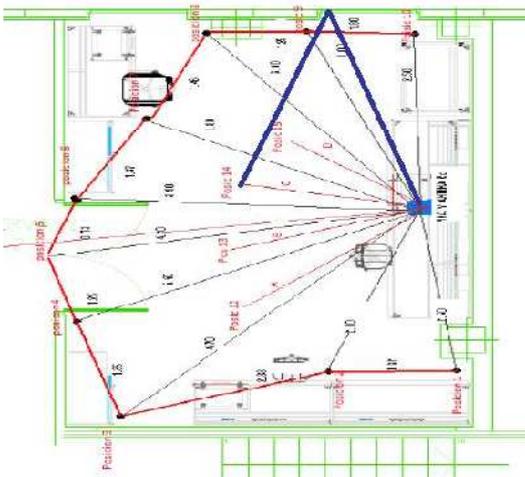


Figura 4.81. Trayectoria de la séptima componente para la posición 14

Para la octava componente:

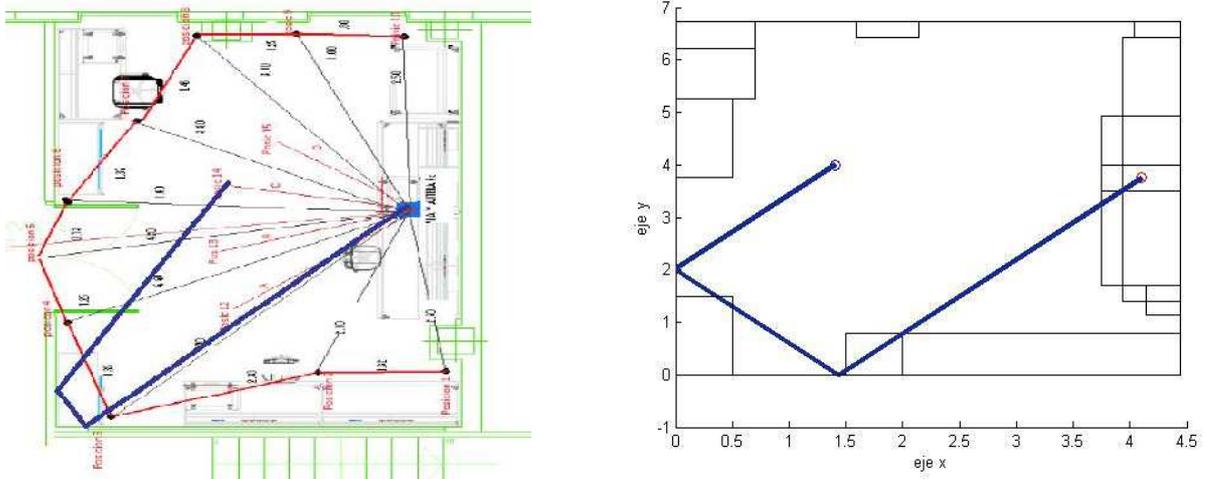


Figura 4.82. Trayectoria de la octava componente para la posición 14

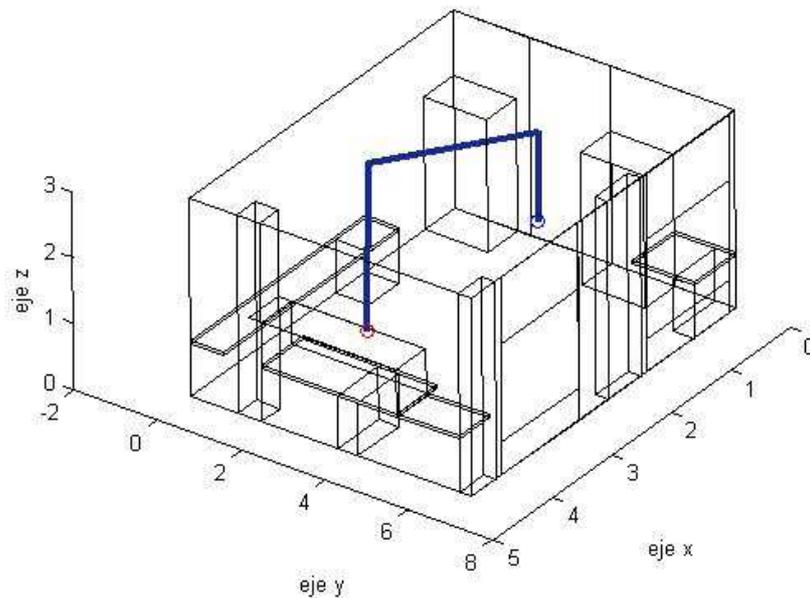


Figura 4.83. Trayectoria de la octava componente para la posición 14 en 3D

Como se puede observar en esta última componente de la Posición 14 los resultados en las medidas y los obtenidos en el simulador son cercanos, pero no idénticos. Esto puede ser uno de los motivos por el que en este caso el RMS obtenido para los datos de las simulaciones no coincidan con los reales, tal como vimos en la Tabla 4.4.

4.3.6 Análisis de la influencia de la permitividad.

En este último apartado del capítulo se analizará una simulación en donde se compararán resultados de una serie de simulaciones en las que variaremos los materiales que componen las paredes.

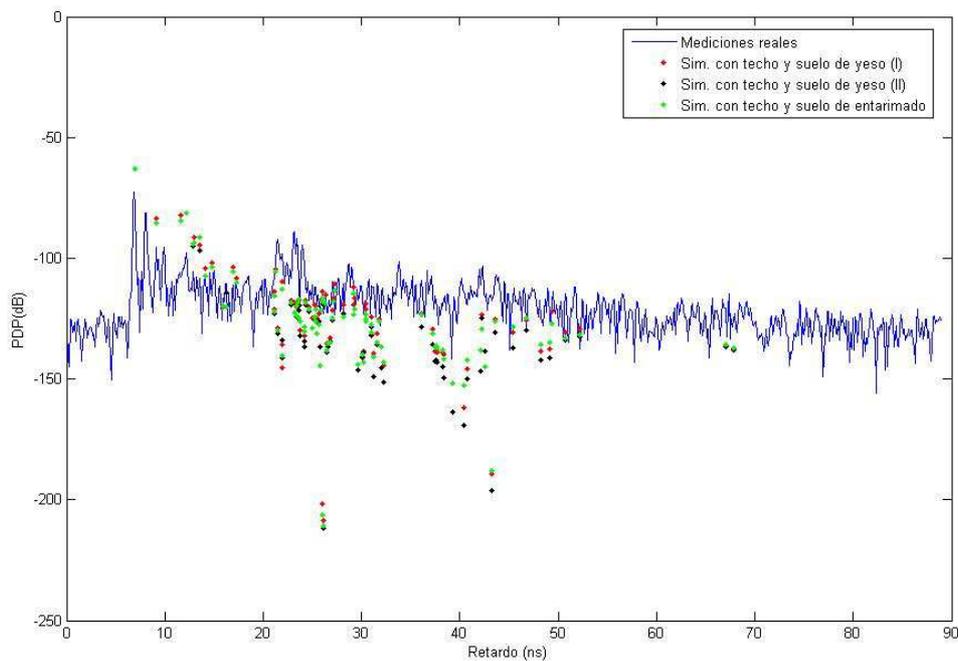


Figura 4.84. PDP de la posición 13 para varios casos

Como se puede observar los resultados no sufren grandes variaciones entre sí. Siendo dichos cambios tan leves que apenas influyen en el resultado final. Consecuentemente se podría afirmar que una pequeña variación en la permitividad de los materiales tal como pudimos observar en el Capítulo 3 no tendría una repercusión muy acusada en los resultados de las simulaciones. Aun así, es de especial interés llegar a un compromiso fiel con las propiedades los materiales que estamos estudiando para obtener unos datos totalmente idénticos a los reales.

Capítulo 5

Conclusiones

En este último capítulo a modo de conclusión se resumirán las principales virtudes del simulador, así como sus mayores defectos y futuras líneas de trabajo que permitirán una mayor precisión en los resultados del mismo.

A partir de las simulaciones que se han ido realizando a lo largo de este proyecto, se han podido analizar diferentes situaciones y escenarios que han permitido medir el grado de precisión del Trazador 3D.

En primer lugar, el Trazador 3D se muestra como una herramienta muy precisa a la hora de medir las pérdidas que introduce el canal. Como se ha observado, las diferencias entre las mediciones realizadas y los resultados obtenidos por el simulador son inferiores a los 3dB, incluso en la mayoría de los casos inferiores a 1dB. Debido a esto podemos calificar a dicho simulador como una buena herramienta para realizar mapas de cobertura a las frecuencias que hemos estudiado. Aunque es importante resaltar que convendría analizar la potencia en muchos puntos del laboratorio (campaña de medida exhaustiva)

para poder comparar, tal como hicimos en el capítulo 3 con la casa típica de una planta [Los].

El Trazador 3D también nos ha permitido estudiar el Power Delay Profile (PDP). En este caso, hay ciertos factores que tienen una mayor influencia en los resultados obtenidos. Gráficamente, se puede observar que los resultados de las simulaciones no son exactamente idénticos a las mediciones. Esto se puede deber a varios factores como puede ser la complejidad de una representación real del entorno del laboratorio. Existen muchos elementos que no se han modelado en el simulador y que pueden influir en la reflexión de ciertos rayos.

Todo lo mencionado anteriormente influye en los resultados, de tal forma que la precisión del simulador a la hora de obtener el PDP no sea completa. Sin embargo, de los datos obtenidos en las simulaciones se observa como hay valores que coinciden que son importantes de reseñar. Obviamente, se puede comprobar cómo el rayo directo coincide en los dos casos. Después existen rayos de mayor influencia que coinciden también en las simulaciones y medidas reales. Si acercamos el transmisor al receptor se percibe una tendencia a una mayor precisión en los resultados, siendo estos más próximos a los reales.

Sin embargo, si se estudia el RMS, podemos ver como los resultados de las simulaciones son muy parecidos a los obtenidos con las medidas. De esta forma queda demostrado que el Trazador 3D realiza una aproximación notablemente correcta del canal. Además, se ha comprobado como los rayos más influyentes que llegan al receptor siguen la misma trayectoria tanto en las medidas reales como en las simulaciones. Es importante por tanto, emplear en el simulador una estructura que se asemeje en lo máximo posible a la habitación, laboratorio, etc. que vayamos a estudiar. Habrá que tener especial cuidado al modelar el entorno de una estructura. Es vital asegurarse que el material con el que trabajamos tiene una permitividad similar a la que empleamos en el simulador.

Aparte de los aspectos positivos que tiene el Trazador 3D, existen ciertos factores negativos que caracterizan al simulador. Principalmente lo más destacable es el tiempo de simulación necesario. A mayor complejidad de la estructura a simular, los tiempos de cómputo se hacen muy elevados. Es importante encontrar un compromiso entre

complejidad y tiempos de simulación. Aunque lógicamente, un equipo con una gran velocidad de procesamiento solucionará este problema.

Uno de los puntos de especial interés, ha sido el estudio de distintos artículos para extraer los valores de permitividad de diferentes materiales a 60 GHz. Los datos obtenidos en los mismos han resultado válidos atendiendo a las simulaciones realizadas. Esto, sin duda, ha facilitado y facilitará el trabajo a la hora de realizar distintas simulaciones. Los datos han sido extraídos de distintos artículos relacionados con mediciones del canal a 60 GHz. Aunque, existen materiales que no han sido estudiados y otros que muestran ciertas ambigüedades en diferentes artículos, por lo que es necesario unas mayores líneas de investigación para lograr caracterizar los materiales que vayamos a emplear lo más fielmente posible.

Esto último, junto a una mayor optimización del programa son las líneas futuras que se deben seguir para lograr un simulador que consiga caracterizar de forma totalmente precisa cualquier estructura o situación que se quiera estudiar.

6. Referencias

- [1] Santiago Pacheco – RFCS Final Work, June'09
- [2] “Advance Engineering Electromagnetics”, C. A. Balanis, New York, 1989
- [3] “Propagation Factors Controlling Mean Field Strength on Urban Streets”, F. Ikegami, S. Yoshida, T. Takeuchi and M. Umehira, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 32, pp. 822-829, December 1984.
- [4] “UHF Propagation Predictions for Wireless Personal Communications”, H. L. Bertoni, W. Honcharenko, L. R. Maciel and H. H. Xia, Proceedings of the IEEW, vol. 82, no. 9, pp. 1333-1359, September 1994.
- [5] “Urban Transmission Loss Models for Small-Cell and Micro-Cell Mobile Radio in the 900 and 1800 MHz Bands”, COST 231, Propagation Models Report, no. COST231 TD(90) 119, revision 1, September 1991.
- [6] “Programación de una herramienta de trazado de rayos 3D basada en GO y UTD”, Valeriano Campillo Torrecillas, Universidad Politécnica de Cartagena, 2008
- [7] “Análisis Teórico-Experimental del Canal Radio en Microceldas y Entornos Especiales para Sistemas de Comunicaciones Móviles de Banda Ancha”, José María Molina Pardo, 2004
- [8] “Modelo de coberturas para redes inalámbricas de interiores”, José Luis Camargo Olivares, Universidad de Sevilla, 2009
- [9] “Medidas de propiedades dieléctricas de materiales de construcción utilizando una guía rectangular”, J. M. Rodríguez, A. López, N. López, V. González, C. Rueda, I. Gómez y J. E. González 2008
- [10] “Caracterización del Canal Móvil”, Juan Pascual García, J.M. Molina García-Pardo, Leandro Juan LLácer Universidad Politécnica de Cartagena, 2010
- [11] “Procedimiento para caracterizar experimentalmente dispositivos pasivos de RF”, Julián A. Rendón y Luis A. Cifuentes Universidad de Cauca, Colombia
- [12] “Predicción de parámetros básicos de propagación de entornos microcelulares mediante técnicas de trazado de rayos”, Rodríguez Jorge Luis, Proyecto Fin de Carrera, ETSIST,UPV, 1999
- [13] “Design of a 60GHz Channel Sounder and Initial Measurements”, Technical University of Cartagena, Group SiCoMo (SPAIN)
- [14] “Informe de Oportunidades y desafíos de la banda ancha”, Gaptel, Coordinador Jorge Pérez, 2008
- [15] “Comparison of measurements and simulations in indoor environments for wireless local networks at 60Ghz”, Y. Lohanen, Y. Corre and Y. Louët, Y. Le Helloco, 2002
- [16] “Antenas”, Ángel Cardama Aznar, Universitat Politècnica de Catalunya, 1998
- [17] “On the Properties of Dielectric Materials in Mobile Communications Environments”, Pertti Vaikinen, 2010
- [18] “Estimation of Materials Characteristics from Power Measurements at 60 Ghz”, Luis M. Correia, Paulo O. França, Technical University of Lisbon
- [19] “Reflection and Transmission Characteristics of Building Materials at 62 Ghz”, J.P. Pugliese, A. Hammoudeh, M.O. Al-Nuaimi, University of Glamorgan, 1996
- [20] “Millimeter-Wave Propagation in Indoor Corridors”, Suiyan Geng, Pertti Vainikainen, 2009
- [21] “Wireless Communication principles and practice”, Rappaport, Theodore S.,
- [22] “Measurement of dielectric parameters of wall materials at 60 GHz band” Lahteenmaki, J.; Karttaavi, T

