

# UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de  
Telecomunicación

## Simulación del canal inalámbrico en trenes de metro para comunicaciones de 5G

**TRABAJO FIN DE GRADO**

GRADO EN INGENIERÍA EN SISTEMAS DE  
TELECOMUNICACIONES



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena

**Autor:** Juan Carlos Anta García  
**Director:** Juan Pascual García

Cartagena, Octubre 2018

# ÍNDICE GENERAL

---

1	Capítulo 1: introducción y definición del proyecto .....	1
1.1	Introducción .....	2
1.2	Objetivos .....	2
1.3	Fases del proyecto.....	3
1.4	Contenido.....	3
2	Capítulo 2: Información sobre el 5G .....	5
2.1	¿Qué es el 5G? ¿Qué servicios y usos tiene? .....	6
2.2	Tecnologías del 5G .....	6
2.2.1	Las ondas milimétricas .....	6
2.2.2	Las microcélulas .....	7
2.2.3	El MIMO masivo .....	7
2.2.4	El <i>beamforming</i> .....	7
2.2.5	La comunicación <i>full duplex</i> .....	7
2.3	Diferencias entre el 4G y el 5G.....	8
3	Capítulo 3: Caracterización del canal inalámbrico .....	9
3.1	Definiciones teóricas .....	10
3.1.1	Función de respuesta al impulso cronovariable .....	10
3.1.2	Perfil de retardo normalizado (Power Delay Profile – PDP).....	10
3.1.3	<i>Path Loss</i> .....	10
3.1.4	Retardo medio.....	10
3.1.5	Valor cuadrático medio del ensanchamiento del retardo (RMS).....	10
3.1.6	Funciones ventana y ventana Hanning .....	10
3.1.7	Fenómeno de reflexión .....	11
3.1.8	Fenómeno de difracción.....	11
3.1.9	Fenómeno de difusión o <i>scattering</i> .....	12
3.2	Software utilizado .....	12
3.2.1	AutoCAD .....	12
3.2.2	MATLAB.....	12
4	Capítulo 4: Desarrollo y resultados .....	13
4.1	Entorno modelado en 3D .....	14
4.2	Análisis cualitativo.....	16
4.2.1	Simulaciones con una reflexión.....	16
4.2.2	Simulaciones con dos reflexiones .....	23
4.2.3	Simulación con dos reflexiones y difracción .....	31

4.2.4	Simulaciones completas con dos reflexiones, difracción y difusión .....	35
4.3	Análisis cuantitativo .....	43
4.3.1	Simulaciones con una reflexión.....	43
4.3.2	Simulaciones con dos reflexiones .....	44
4.3.3	Simulaciones con dos reflexiones y difracción.....	44
4.3.4	Simulaciones completas con dos reflexiones, difracción y difusión .....	45
5	Capítulo 5: Conclusiones y líneas futuras.....	46
6	Capítulo 6: Bibliografía .....	48
7	Anexos.....	50
7.1	Plano del tren de metro .....	50
7.2	Propiedades de los materiales utilizados.....	51

## ÍNDICE DE TABLAS

---

1	Datos de RMS, VM y PL en el escenario uno con una reflexión.....	43
2	Datos de RMS, VM y PL en el escenario dos con una reflexión. ....	43
3	Datos de RMS, VM y PL en el escenario uno con dos reflexiones.....	44
4	Datos de RMS, VM y PL en el escenario dos con una reflexiones.....	44
5	Datos de RMS, VM y PL en el escenario uno con dos reflexiones y difracción.....	45
6	Datos de RMS, VM y PL en el escenario dos con dos reflexiones y difracción. ....	45
7	Datos de RMS, VM y PL en el escenario uno con dos reflexiones, difracción y difusión. ....	45
8	Datos de RMS, VM y PL en el escenario dos con dos reflexiones, difracción y difusión.....	45

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

1	Ventana Hanning en el dominio del tiempo (izquierda) y en el dominio de la frecuencia (derecha). .....	11
2	Imagen representativa de cómo es el fenómeno de reflexión. ....	11
3	Imagen representativa de cómo es el fenómeno de difracción. ....	11
4	Imagen representativa de cómo es el fenómeno de difusión o scattering. ....	12
5	Posiciones y orientación del transmisor y receptor. ....	14
6	Vista del tren desde arriba (Eje XY) modelado del Anexo uno. ....	15
7	Vista del tren desde el fondo (Eje XZ) modelado del Anexo uno. ....	15
8	Vista del tren desde el lado (Eje YZ) modelado del Anexo uno. ....	16
9	Comparación del PDP medido con el PDP simulado en el escenario uno, posición uno (5m). Una reflexión .....	17
10	Reflexiones que corresponden a las distintas contribuciones del PDP mostrado en la Figura 9. ....	17
11	<i>Zoom</i> realizado en la Figura 8 entre 2.5 y 7.5 m de distancia. ....	18
12	Comparación del PDP medido con el PDP simulado en el escenario uno, posición ocho (50 m). Una reflexión. ....	19
13	Reflexiones que corresponden a las distintas contribuciones del PDP mostrado en la Figura 11. ....	19
14	Comparación del PDP medido con el PDP simulado en el escenario dos, posición uno (5 m). Una reflexión. ....	20
15	<i>Zoom</i> realizado en la Figura 8 entre 5 y 6.5 m de distancia. ....	21
16	Reflexiones que corresponden a las distintas contribuciones del PDP mostrado en la Figura 14. ....	21
17	Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario dos, posición seis (50 m). Una reflexión. ....	22
18	<i>Zoom</i> realizado en la Figura 16 entre 50 y 57 m de distancia. ....	22
19	Reflexiones que corresponden a las distintas contribuciones del PDP mostrado en la Figura 17. ....	23
20	Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario uno, posición uno (5 m). Dos reflexiones. ....	24
21	Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario uno, posición uno (5m). Dos reflexiones. Sin barandillas. ....	24
22	Reflexiones que corresponden a las distintas contribuciones del PDP mostrado en la Figura 20. ....	25
23	Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario uno, posición cuatro (20 m). Dos reflexiones. ....	25
24	Reflexiones que corresponden a las distintas contribuciones del PDP mostrado en la Figura 23. ....	26

25	Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario uno, posición ocho (50 m). Dos reflexiones.....	26
26	Reflexiones que corresponden a las distintas contribuciones del PDP mostrado en la Figura 25.....	27
27	Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario dos, posición uno (5 m). Dos reflexiones.....	28
28	Reflexiones que corresponden a las distintas contribuciones del PDP mostrado en la Figura 27.....	28
29	Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario dos, posición tres (20 m). Dos reflexiones.....	29
30	Reflexiones que corresponden a las distintas contribuciones del PDP mostrado en la Figura 29.....	29
31	Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario dos, posición seis (50 m). Dos reflexiones.....	30
32	Reflexiones que corresponden a las distintas contribuciones del PDP mostrado en la Figura 31.....	31
33	Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario uno, posición uno (5 m). Dos reflexiones más difracción. ....	32
34	Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario uno, posición ocho (50 m). Dos reflexiones más difracción. ....	33
35	Comparación, con <i>zoom</i> entre los 50 y 60 m, del PDP medido con el PDP simulado con dos reflexiones y con el PDP simulado con dos reflexiones más difracción en escenario uno, posición ocho (50 m).....	33
36	Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario dos, posición uno (5 metros). Dos reflexiones más difracción.....	34
37	Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario dos, posición seis (50 metros). Dos reflexiones más difracción.....	35
38	Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario uno, posición uno (5 m). Completo.....	36
39	Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario uno, posición dos (10 m). Completo.....	36
40	Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario uno, posición tres (15 m). Completo.....	37
41	Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario uno, posición cuatro (20 m). Completo.....	37
42	Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario uno, posición cinco (35 m). Completo.....	38
43	Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario uno, posición seis (40 m). Completo.....	38
44	Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario uno, posición siete (45 m). Completo.....	39

45	Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario uno, posición ocho (50 m). Completo.....	39
46	Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario dos, posición uno (5 m). Completo.....	40
47	Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario dos, posición dos (12 m). Completo.....	40
48	Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario dos, posición tres (20 m). Completo.....	41
49	Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario dos, posición cuatro (40 m). Completo.....	41
50	Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario dos, posición cinco (45 m). Completo.....	42
51	Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario uno, posición seis (50 m). Completo.....	42

# CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y DEFINICIÓN DEL PROYECTO

# 1 CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y DEFINICIÓN DEL PROYECTO

---

## 1.1 INTRODUCCIÓN

No fue hace más de 50 años cuando el 1G empezó a salir a la luz, con el estándar Advanced Mobile Phone System (AMPS), para luego llegar hasta nuestros días el 4G, con el estándar Long Term Evolution (LTE). Las comunicaciones móviles han ido evolucionando rápidamente conforme la sociedad ha requerido su uso.

El 1G empezó a ser comercial durante los 70', mediante el estándar AMPS. Era analógico, ofrecía solo el servicio de voz y conseguía una velocidad de 1 kbps hasta 2,4 kbps. Además, usaba multiplexación por división en frecuencia (FDMA). Las bandas de frecuencias que utilizaba eran las de 450 MHz, 800 MHz y 900 MHz, con un ancho de banda de 30 kHz. <sup>[1]</sup>

Posteriormente, se comercializó el 2G como la primera red de comunicación móvil digital durante los 80'. Ya no solamente ofrecía un servicio de voz, sino también uno de datos. Las velocidades aumentaron hasta los 64 kbps, siendo veinticinco veces más rápido que su predecesor. El estándar más conocido es el Sistema Global para Comunicaciones Móviles (GSM). Usa multiplexación por división en el tiempo (TDMA) y las bandas de frecuencias que utiliza son las de 900 MHz y 1800 MHz con un ancho de banda de 200 kHz.

Con la llegada del nuevo milenio, también llegó el 3G aumentando las prestaciones de la anterior generación: mayor capacidad, mayor velocidad, mejor soporte... Uno de los estándares de esta generación fue el Universal Mobile Telecommunications System (UMTS). Ofrecía los servicios de voz y datos, como en 2G, pero con unas velocidades de hasta 2Mbps. Este aumento de velocidad fue gracias al uso del acceso múltiple por división de código de banda ancha (WCDMA). Su banda de frecuencias se sitúa en los 2 GHz con un ancho de banda de 5 MHz.

Por último, se comercializó el 4G a partir del 2010/2011 con la novedad de estar basado en IP. Esto es con el objetivo de obtener mayores velocidades, mayor capacidad y mayor seguridad a bajo coste. Los estándares asociados al 4G son el Long Term Evolution (LTE) y el WiMax. Con su velocidad de 100 Mbps, los servicios dados en esta generación son mucho mayores, desde la telefonía IP y un acceso móvil web hasta la misma televisión móvil de alta definición. Utiliza varias bandas de frecuencias, pero las más comunes son la de 800 MHz, la de 900 MHz y la de 1800 MHz, con unos anchos de banda adaptativos desde los 5 MHz hasta los 20 MHz. [1] [2]

La próxima generación que se está desarrollando es el 5G, el que nos ocupa en este Trabajo de Fin de Grado. Esta nueva generación supone una revolución en las redes de comunicaciones, es por ello por lo que se explicará con mayor detenimiento en el Capítulo 2.

## 1.2 OBJETIVOS

En un futuro próximo, el 5G se comercializará y todos los consumidores podrán disfrutarlo con todas sus ventajas en todos los lugares que se puedan imaginar. Uno de esos lugares sería el metro. Debido a su dificultad, en principio, por ser un espacio subterráneo y tener varios materiales diferentes tanto en las estaciones como en el mismo tren, se debe optimizar la tecnología 5G lo mejor posible. Es por esto que se realiza este proyecto.

El objetivo del presente proyecto, entonces, es la realización de un entorno capaz de simular, lo más exacto posible en un trazador de rayos, el Power Delay Profile (PDP) de una comunicación 5G producida entre un receptor y un transmisor estáticos dentro de un vagón de metro.

Para lograr dicho objetivo, se dispone de las medidas realizadas en el mismo metro en varios escenarios y posiciones diferentes, un trazador de rayos programado en MATLAB y los planos del mismo vagón de metro como apoyo para realizar el entorno.

La finalidad del entorno, además, es la de poder realizar simulaciones en situaciones en las que no se podría hacer medidas en el vagón de metro. Por ejemplo, cuando hay muchas personas dentro. Gracias a este entorno, se podría reproducir esa situación añadiendo figuras que simularan ser personas.

### 1.3 FASES DEL PROYECTO

El proyecto se realizó en cuatro fases: modelado del interior del tren de metro, búsqueda de valores precisos de las características electromagnéticas de los materiales presentes en la unidad de metro, simulación del canal inalámbrico con un trazador de rayos que utiliza el modelo descrito en Matlab y conclusiones y análisis final.

En el modelado del interior del tren de metro se programó en código MATLAB, gracias a los planos del tren obtenidos, una recreación del tren en tres dimensiones para su posterior uso en el trazador de rayos.

Posteriormente, en búsqueda de valores precisos de las características electromagnéticas de los materiales presentes en la unidad de metro se procedió a identificar los datos de los materiales, tales como la permitividad y la conductividad, para realizar la simulación de la manera precisa.

En tercer lugar, se realizó la simulación del canal inalámbrico con un trazador de rayos bajo distintas premisas comparando los valores simulados con los obtenidos mediante la medición. Teniendo en cuenta que se debían parecer a estos últimos, también se realizó algunos pulimentos en el entorno aprovechando esto.

Por último, en las conclusiones y el análisis final se realizó la comparación entre las distintas posiciones con los datos recogidos y simulados estimando la precisión del modelo. Además, se plantea cómo se podría mejorar el modelo en un futuro.

### 1.4 CONTENIDO

Esta memoria se dividirá en seis capítulos: Introducción y definición del proyecto, Información sobre el 5G, Terminología, Desarrollo y resultados, Conclusiones y Bibliografía.

En el primer capítulo, Introducción y definición del proyecto, se da una breve explicación de las diferentes generaciones de redes de comunicaciones que ha habido a lo largo de nuestra historia con la finalidad de dar un contexto. Además, se define el proyecto indicando los objetivos, las fases de realización y el contenido de la memoria.

El segundo capítulo, Información sobre el 5G, explica las características que tiene esta nueva red de comunicación, actualmente en desarrollo, en comparación con sus predecesoras. Esto es para determinar el impacto que puede resultar la nueva red de comunicaciones en la evolución tecnológica y, con ello, justificar este mismo proyecto.

En Terminología, el tercer capítulo, se explicarán los diferentes términos relacionados con las comunicaciones móviles que se utilizarán en la memoria. Además, se indica el software utilizado durante el proyecto y su finalidad.

El cuarto capítulo, Desarrollo y resultados, tratará de explicar el proyecto y mostrar los diferentes resultados obtenidos. Esto es tanto de manera cualitativa, mediante figuras, como cuantitativa, mediante tablas.

En el quinto capítulo, Conclusiones, se indicará cómo de precisos han sido los diferentes resultados para el objetivo que se planteó al inicio y se propondrá distintas maneras para mejorar esos resultados en un futuro.

Por último, en Bibliografía se indicarán las distintas fuentes usadas tanto para la realización del proyecto como para la realización de la memoria.

# CAPÍTULO 2: INFORMACIÓN SOBRE EL 5G

## 2 CAPÍTULO 2: INFORMACIÓN SOBRE EL 5G

---

### 2.1 ¿QUÉ ES EL 5G? ¿QUÉ SERVICIOS Y USOS TIENE?

El 5G es la quinta generación de la red de comunicación móvil. A diferencia de generaciones previas, se plantea que ésta sea una revolución en el mundo de las comunicaciones. Esto es por el hecho de que no solamente tiene la finalidad de mantener a personas unidas a la red, sino también dispositivos de todo tipo gracias al Internet de las Cosas (IoT).

Esto último es uno de los servicios que plantea el 5G. Gracias a éste, se podrá conectar una gran cantidad de sensores entre sí y con nosotros debido a la posibilidad de variar las tasas de datos y la potencia, pudiendo abrir un gran abanico de posibilidades a nuevas ideas con bajo presupuesto.

Además, centrándose en la idea de conectarnos con dispositivos de manera lejana, pretende llegar al siguiente nivel respecto al control remoto. Esto es que, gracias a la estabilidad y la baja latencia de las redes 5G, se pueda controlar de manera remota algunas infraestructuras, vehículos e, incluso, procedimientos médicos.

Por último, esto ya más relacionado con los usuarios, está la mejora en la banda ancha móvil. Esto permitirá mejorar las utilidades de los *smartphones*, permitiendo nuevas experiencias a los usuarios, como la retransmisión en directo mediante realidad virtual o la realidad aumentada. Esto actualmente es prácticamente imposible, pero, gracias a unas mayores velocidades, unas tasas de datos más estables y una baja latencia, se podría conseguir en un futuro próximo. [3]

### 2.2 TECNOLOGÍAS DEL 5G

El 5G aún está en desarrollo, por lo que no se puede saber exactamente qué tecnologías serán las que lo eleven a su máximo exponente. Sin embargo, para lograr las grandes velocidades y las bajas latencias que se tienen por objetivo, Nordrum en su artículo *Everything you need to know about 5G* explica las cinco más prometedoras y que se relacionan entre sí: las ondas milimétricas, las microcélulas, el MIMO masivo, el *beamforming* y la comunicación *full duplex*.

#### 2.2.1 Las ondas milimétricas

Uno de los factores para tener en cuenta es la cantidad de usuarios que utilizan las redes de comunicaciones. Conforme pasa el tiempo, más personas y más dispositivos la consumen. Sin embargo, las bandas de radiofrecuencia son las mismas y, conforme más gente usa la red, menor ancho de banda disponible hay. Esto causa que los servicios se ralenticen y, en el peor de los casos, que se produzca inestabilidad del sistema en forma de caídas de conexión.

La solución a esto es utilizar frecuencias jamás utilizadas en el ámbito móvil. Estas son las ondas milimétricas. Son llamadas así debido a que su longitud de onda se sitúa entre los 1 y los 10 milímetros. En comparación con las ondas de radio de los *smartphones* de hoy en día, son entre diez y cincuenta veces menos, ya que usan decenas de centímetros de longitud de onda.

Esta tecnología, sin embargo, tiene un inconveniente: es muy sensible a los obstáculos. Esto es que tiene dificultades para atravesar paredes, además de verse afectado por algunos efectos de tiempo atmosférico, como la lluvia. Esto tiene una solución: las microcélulas.

### 2.2.2 Las microcélulas

Las microcélulas son estaciones base, de menor tamaño que las de ahora, que requieren una potencia mínima para su funcionamiento y pueden situarse cada 250 metros por toda una ciudad. Instalando varias de estas estaciones a lo largo de una ciudad, se hace una red compacta que evita las caídas de conexión y transmite la información de un usuario a otro independientemente de la localización.

Este cambio de la estructura de la red proporciona una mayor eficiencia en el uso del espectro. Al tener muchas estaciones, esto significa que las frecuencias que una estación utiliza para conectar los dispositivos en una zona pueden volverse a usar por otra estación en una zona diferente para otra conexión. El inconveniente de esta tecnología es que, al tener que estar próximas unas de otras, hacer una red 5G en los entornos rurales podría ser más complejo.

### 2.2.3 El MIMO masivo

Las estaciones base antes mencionadas tendrían, a pesar de ser más pequeñas, más antenas que las estaciones de hoy en día. Esto permite que haya una nueva tecnología: el MIMO masivo.

Las estaciones base de 4G ya tienen doce antenas para mantener todo el tráfico. Sin embargo, las estaciones base de 5G pueden soportar hasta cien, por lo que habría más antenas disponibles para la conexión. Esto permite poder recibir y enviar señales a varios usuarios a la vez, incrementando la capacidad de las redes móviles por veintidós o más.

MIMO significa *multiple-input multiple-output* (entrada y salida múltiples) y consiste en utilizar varias antenas para enviar y recibir una señal aprovechando las reflexiones producidas por el efecto multicamino y mejorar ésta, perdiendo menos datos en el proceso y aumentando la velocidad. El MIMO masivo coge este concepto y lo eleva al siguiente nivel añadiendo un mayor número de antenas.

Sin embargo, el haber más antenas produce también más interferencias debido a las señales que se cruzan entre sí. Por ello se debe incorporar la siguiente tecnología: el *beamforming*.

### 2.2.4 El *beamforming*

El *beamforming* consiste en identificar la mejor ruta en cuanto a eficiencia de transmisión de datos para un usuario en concreto. Esto hace reducir las interferencias del resto de usuarios al concentrarse los rayos en una ruta y evitar cruces innecesarios.

Mediante esto último, puede ayudar al MIMO masivo para conseguir una mayor eficiencia en el espectro. En las estaciones base con MIMO masivo, un algoritmo de procesamiento de señal calcula la mejor ruta de transmisión para cada usuario. Entonces, pueden enviar varios paquetes de datos a diferentes direcciones concretas, de tal manera que se reflejen en el resto de los obstáculos de manera precisa para llegar a su destino de forma óptima. Esto permitiría solucionar en gran parte el problema del MIMO masivo.

También permite solucionar parte del problema de las ondas milimétricas. Éstas son muy sensibles a los obstáculos, por lo que fácilmente puede perderse grandes partes de la señal por ello. Con el *beamforming*, se puede reforzar una señal mediante un rayo concentrado que apunte hacia la dirección del usuario, en vez de enviar en varias direcciones a la vez.

### 2.2.5 La comunicación *full duplex*

Anteriormente se ha hablado de cómo mejorar las tasas de datos, la conectividad y solucionar el problema del crecimiento de usuarios. Sin embargo, uno de los mayores retos del 5G es también bajar la latencia, el cual se pretende conseguir con esta tecnología.

Hoy en día las estaciones base deben turnarse para transmitir y recibir la información cuando se usa la misma frecuencia o usar frecuencias diferentes cuando se quieren transmitir y recibir información al mismo tiempo.

Con el 5G, un transmisor podrá transmitir y recibir datos al mismo tiempo y en la misma frecuencia. En esto consiste la comunicación *full duplex*. Para lograr esto, se debe diseñar un circuito que pueda encaminar señales tanto entrantes como salientes para que no choquen mientras la antena transmite y recibe datos al mismo tiempo. Esto es complejo por la tendencia de las ondas de radio de avanzar y retroceder en la misma frecuencia, pero recientemente se están probando transistores de silicón que pueden funcionar como conmutadores evitando que las ondas retrocedan.

El único inconveniente de la comunicación *full duplex* es que se crea más interferencias en la señal en forma de eco. Esto es debido a que la señal transmitida es mucho más potente que la recibida. Entonces, para tener una antena que transmita y reciba al mismo tiempo, se debe usar tecnologías especiales de cancelación de eco. [4]

### 2.3 DIFERENCIAS ENTRE EL 4G Y EL 5G

Con el uso de las tecnologías anteriormente explicadas, el 5G se diferencia del 4G casi todos los ámbitos.

El 5G llega unas tasas de datos de pico de 20 Gbps y unas tasas promedio de 100 Mbps, cuando el 4G llega de máximo precisamente a los 100 Mbps. Además, gracias a sus altas frecuencias, optimiza mejor el espectro que el 4G, ya que este lo comparte con más tecnologías, habiendo bandas desde 1 GHz hasta las bandas de las ondas milimétricas, de 30 GHz a 300 GHz.

Gracias a las tecnologías de comunicación *full duplex* y el MIMO masivo, la latencia en el 5G podría llegar a 1 ms a diferencia de los 20 ms que se pueden conseguir con 4G. Esto supone que prácticamente, gracias al 5G, se consiga un verdadero acceso en tiempo real. [3]

# CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIÓN DEL CANAL MÓVIL

## 3 CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIÓN DEL CANAL INALÁMBRICO

---

### 3.1 DEFINICIONES TEÓRICAS

#### 3.1.1 Función de respuesta al impulso cronovisible

Esta es la función que se calcula en las simulaciones y queda representada posteriormente como el perfil de retardo normalizado. Se interpreta como la respuesta del canal a un impulso generado  $\tau$  segundos después. En el programa de simulación, se calcula este valor desde el dominio de la frecuencia, asumiendo que el canal es estático ya que de otra manera no se podría calcular con este método, mediante la transformada inversa de Fourier.

$$h(\tau) = TF^{-1}[H(f)] \quad 1$$

#### 3.1.2 Perfil de retardo normalizado (Power Delay Profile – PDP)

Es la función que se representa en las simulaciones respecto a la distancia. Sirve para medir la dispersión en el dominio del tiempo. Se obtiene a partir de la función de respuesta al impulso cronovisible  $h(t, \tau)$  utilizando pulsos de corta duración  $t$  equivalentes a una delta de Dirac. Siendo  $k$  la ganancia que relaciona la potencia  $P(t)$  con la potencia total repetida y teniendo en cuenta que normalmente es un canal aleatorio y se hacen varias medidas, su ecuación es la siguiente:

$$P(\tau) = \overline{k|h(\tau)|^2} \quad 2$$

#### 3.1.3 Path Loss

Es uno de los valores que se calcula en las simulaciones. Son las pérdidas producidas en la estación móvil. Son directamente proporcionales a la distancia entre transmisor y receptor. En nuestro caso, los calcularemos mediante el sumatorio en  $P(\tau)$ . Su ecuación es la siguiente:

$$PL(dB) = \sum_1^k P(\tau_k) \quad 3$$

#### 3.1.4 Retardo medio

Es otro de los valores que se calcula en las simulaciones. Se define como el primer momento del PDP. Esto es que indicará dónde se encuentran las réplicas con mayor potencia al tener una influencia mayor. Su ecuación es la siguiente:

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k P(\tau_k)\tau_k}{\sum_k P(\tau_k)} \quad 4$$

#### 3.1.5 Valor cuadrático medio del ensanchamiento del retardo (RMS)

Es el último valor que se calcula en las simulaciones. Este valor define el ensanchamiento del retardo en torno al exceso de retardo medio. Esto es, la cantidad y potencia de réplicas multicamino. Cuanto mayor número de réplicas y más potencia tengan, mayor es este valor. Su ecuación es la siguiente:

$$\sigma_\tau = \sqrt{\overline{\tau^2} - (\bar{\tau})^2} \quad \text{siendo} \quad \overline{\tau^2} = \frac{\sum_k P(\tau_k)\tau_k^2}{\sum_k P(\tau_k)} \quad 5$$

#### 3.1.6 Funciones ventana y ventana Hanning

Las funciones ventana son unas funciones matemáticas usadas en el procesamiento de señales cuyo objetivo es el de procesar una parte de la señal en concreto. En este proyecto, se ha

utilizado la ventana Hanning al ser selectiva y diferenciar claramente las diferentes replicas, como se muestra a continuación:

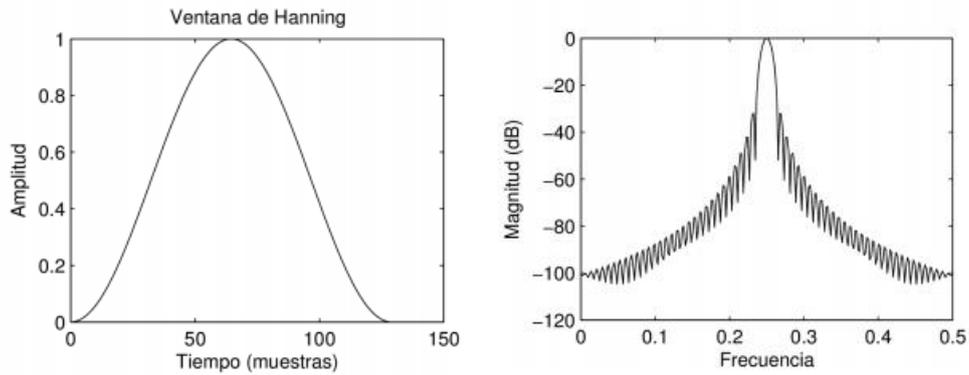


Figura 1. Ventana Hanning en el dominio del tiempo (izquierda) y en el dominio de la frecuencia (derecha). [6]

### 3.1.7 Fenómeno de reflexión

El fenómeno de reflexión es un mecanismo de propagación que consiste en el cambio de dirección que una onda experimenta cuando choca con la superficie de separación entre dos medios diferentes. La onda resultante, la que cambia de dirección, sale de la superficie de separación con el mismo ángulo con el que incidió. Además, tanto el rayo incidente como el reflejado y la normal están en el mismo plano. Se puede apreciar en la figura siguiente:

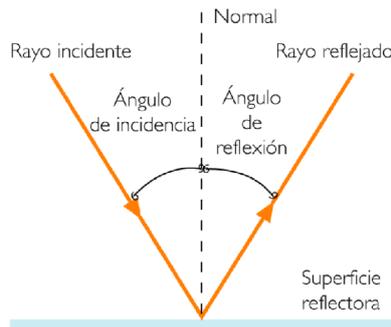


Figura 2. Imagen representativa de cómo es el fenómeno de reflexión. [7]

### 3.1.8 Fenómeno de difracción

El fenómeno de difracción es un mecanismo de propagación que consiste en la generación de ondas secundarias cuando una onda electromagnética incide sobre un obstáculo puntiagudo o afilado, como indica el principio de Huygens, que permiten sortear obstáculos cuando no hay visión directa entre transmisor y receptor ni contribuciones debidas al fenómeno de reflexión. En la siguiente figura se puede observar visualmente de qué trata este fenómeno:

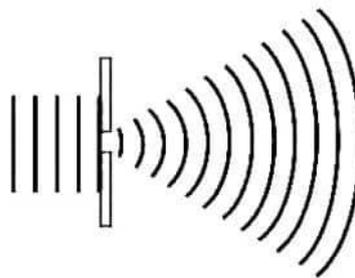


Figura 3. Imagen representativa de cómo es el fenómeno de difracción. [8]

### 3.1.9 Fenómeno de difusión o *scattering*

El fenómeno de difusión o *scattering* es un mecanismo de propagación que se produce cuando la onda electromagnética choca con objetos cuyo tamaño es pequeño comparado con la longitud de onda o cuando choca con obstáculos rugosos y la energía reflejada se difunde en todas las direcciones del espacio. La figura que se muestra a continuación compara el fenómeno de reflexión que se explicó previamente con el fenómeno de difusión: [5]

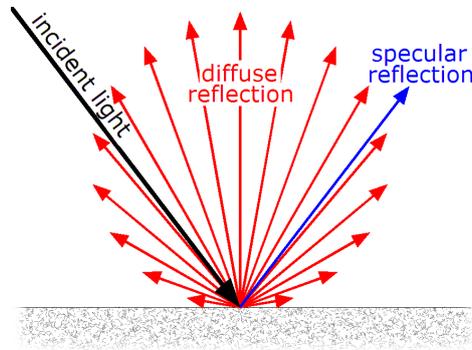


Figura 4. Imagen representativa de cómo es el fenómeno de difusión o *scattering*. [9]

## 3.2 SOFTWARE UTILIZADO

### 3.2.1 AutoCAD

AutoCAD es un software de diseño asistido por ordenador utilizado para dibujo 2D y modelado 3D. Actualmente es desarrollado y comercializado por la empresa Autodesk. AutoCAD es un software reconocido a nivel internacional por sus amplias capacidades de edición, que hacen posible el dibujo digital de planos de edificios o la recreación de imágenes en 3D; es uno de los programas más usados por arquitectos, ingenieros y diseñadores industriales. [10]

En el proyecto se ha utilizado AutoCAD para sacar las medidas del plano del vagón de metro para realizar el entorno, ya que el plano estaba bajo la extensión DXF.

### 3.2.2 MATLAB

MATLAB es un software matemático con un lenguaje propio. Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware. Es un software muy usado en universidades y centros de investigación y desarrollo. En los últimos años ha aumentado el número de prestaciones, como la de programar directamente procesadores digitales de señal o crear código VHDL. [11]

Es el programa donde se ha basado todo el proyecto. Tanto el entorno de simulación como el trazador de rayos están programados en MATLAB y es el software encargado de realizar las simulaciones. En el Capítulo 4, Desarrollo y resultados, se procede a explicar cómo es el código desarrollado en el entorno de simulación y cómo funciona el código desarrollado en el trazador de rayos.

## CAPÍTULO 4: DESARROLLO Y RESULTADOS

## 4 CAPÍTULO 4: DESARROLLO Y RESULTADOS

Entrando en el desarrollo del proyecto, se va a proceder a observar primero el entorno modelado en 3D para, posteriormente, mostrar un análisis cualitativo, mostrando el PDP, y un análisis cuantitativo, mostrando los valores de retardo medio, *path loss* y valor cuadrático medio del retardo, de cada una de las diferentes posiciones con los diferentes mecanismos de propagación.

Los dos escenarios utilizados corresponden a un receptor posicionado en el centro del tren, a unos dos metros de distancia de la pared frontal del tren y con una altura de 1.63 m. Las diferencias entre los dos escenarios estudiados corresponden a las posiciones del transmisor; en el escenario uno el transmisor está en el centro del tren y con una altura de 1.45 m para simular la posición de un pasajero que está de pie, mientras que en el escenario dos el transmisor está en un lateral del tren, al lado de las sillas, con una altura de 0.85 m para simular la posición de un pasajero sentado.

En el escenario uno, las posiciones se corresponden con un transmisor que se encuentra a una distancia del receptor de 5 hasta 50 m (5, 10, 14, 20, 35, 40, 45 y 50 m). Las posiciones del escenario dos también miden desde 5 hasta 50 m, pero esta vez de manera diferente (5, 10, 20, 40, 45 y 50 m).

El PDP simulado responde a un array de siete por siete antenas uniformes virtuales colocado en el receptor. Son uniformes al estar separados entre sí por una misma constante y virtuales porque no son realmente cuarenta y nueve antenas.

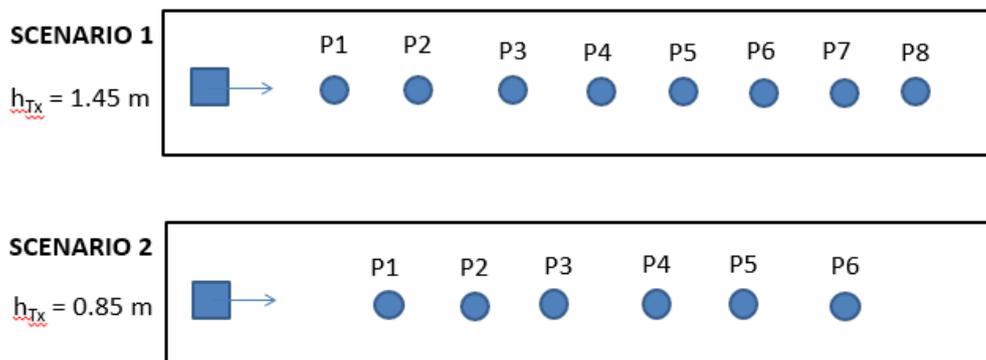


Figura 5. Posiciones y orientación del transmisor y receptor.

### 4.1 ENTORNO MODELADO EN 3D

El entorno modelado en 3D se ha realizado con MATLAB siguiendo el plano del tren de metro base, el cual se puede observar en el Anexo uno. Este entorno está programado de tal manera que se pueda quitar cualquier grupo de elementos, esto es para poder trabajar con él de manera óptima en los diferentes mecanismos de propagación y ahorrar tiempo de computación. Los materiales utilizados en el entorno son el plástico ABS, el aluminio y el cristal. En el Anexo dos se indica los valores utilizados en sus propiedades para la simulación. El entorno modelado del metro con todos los elementos lo podemos observar en las siguientes tres figuras:

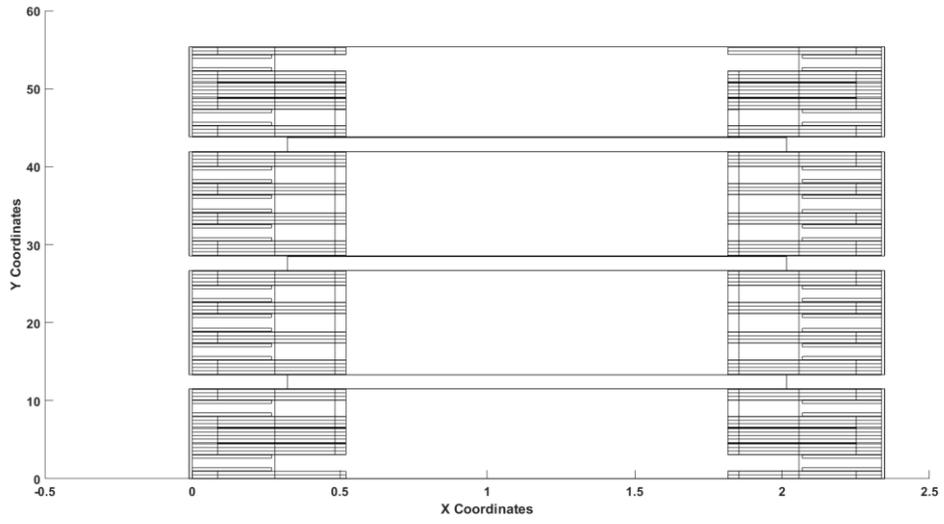


Figura 6. Vista del tren desde arriba (Eje XY) modelado del Anexo uno.

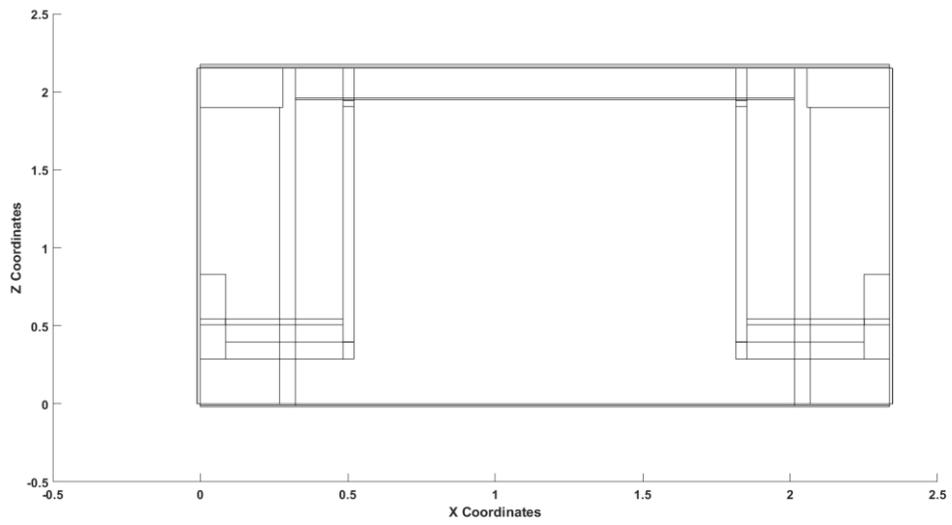


Figura 7. Vista del tren desde el fondo (Eje XZ) modelado del Anexo uno.

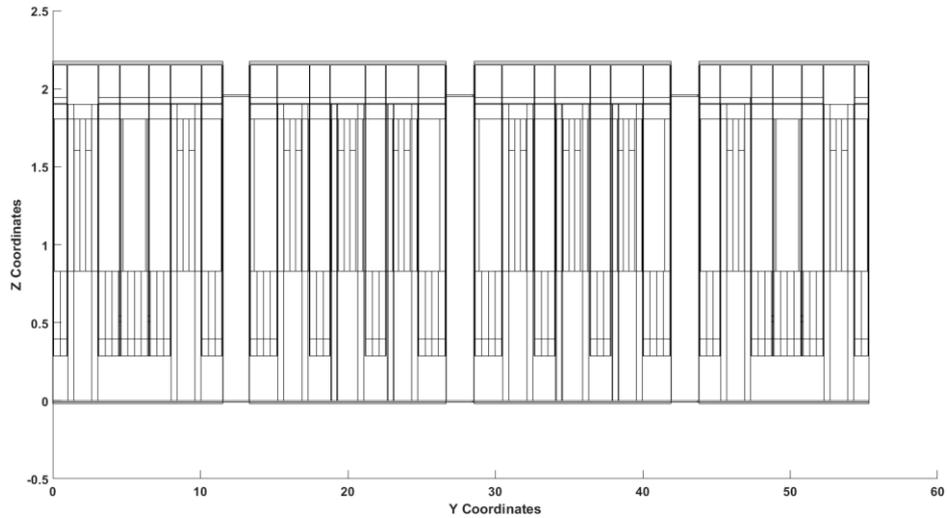


Figura 8. Vista del tren desde el lado (Eje YZ) modelado del Anexo uno.

En la Figura 6 se muestra cómo se han realizado las sillas y las barandillas, tanto horizontales como verticales. En la Figura 7 se puede observar cómo se han realizado las puertas y los cristales junto a las barandillas superiores. Además, se puede apreciar en las tres figuras como hay un revestimiento en todas las paredes, excepto en la frontal y en la del fondo, que tiene dos partes. El revestimiento interior representa parte el grosor del panel de plástico que tiene el tren. Mientras, el exterior, representa el esqueleto de aluminio del tren.

Para el cálculo de cada mecanismo de propagación se ha utilizado un entorno diferente, quitando elementos para que el tiempo de computación no fuera excesivo. Para el cálculo de las reflexiones se quitó las sillas, al no afectar en gran medida a las simulaciones, y los elementos de plástico situados al lado de las puertas, por afectar a las simulaciones negativamente debido a la imprecisión de cómo están hechos exactamente. En el cálculo de la difracción se trabajó sin el revestimiento y en el cálculo de la difusión sin ningún elemento más que las paredes.

## 4.2 ANÁLISIS CUALITATIVO

En este apartado se mostrarán los diferentes resultados, en forma de figuras, obtenidos en el entorno modelado en 3D mostrado en el apartado anterior.

Antes de mostrar todos los resultados se enseñará los diferentes resultados previos, menos completos, para comprender la dirección que toman las diferentes contribuciones del PDP. En todas ellas, la primera contribución corresponde con el rayo directo. Por ello, se obviará a la hora de hablar las contribuciones en favor de explicar los diferentes mecanismos en los que sí varía según la situación. Todos los PDP mostrados siguen siempre la siguiente leyenda:

— PDP medido  
— PDP simulado

### 4.2.1 Simulaciones con una reflexión

En este apartado se analizarán los diferentes componentes del PDP cuando se trabaja con una reflexión. Se enseñará dos posiciones de cada escenario: una en el que el transmisor y receptor estén cerca y otra en el que estén a una distancia alejada.

#### 4.2.1.1 Escenario uno

##### 4.2.1.1.1 Posición uno

En la posición uno, representado por la Figura 8, se puede observar cómo coinciden algunas contribuciones, en distancia recorrida, con el PDP medido. Estas contribuciones corresponden a las reflexiones producidas en el techo, el suelo, las dos paredes laterales, la pared frontal y la pared del fondo. Con ayuda de la Figura 9 se puede observar la procedencia de los rayos.

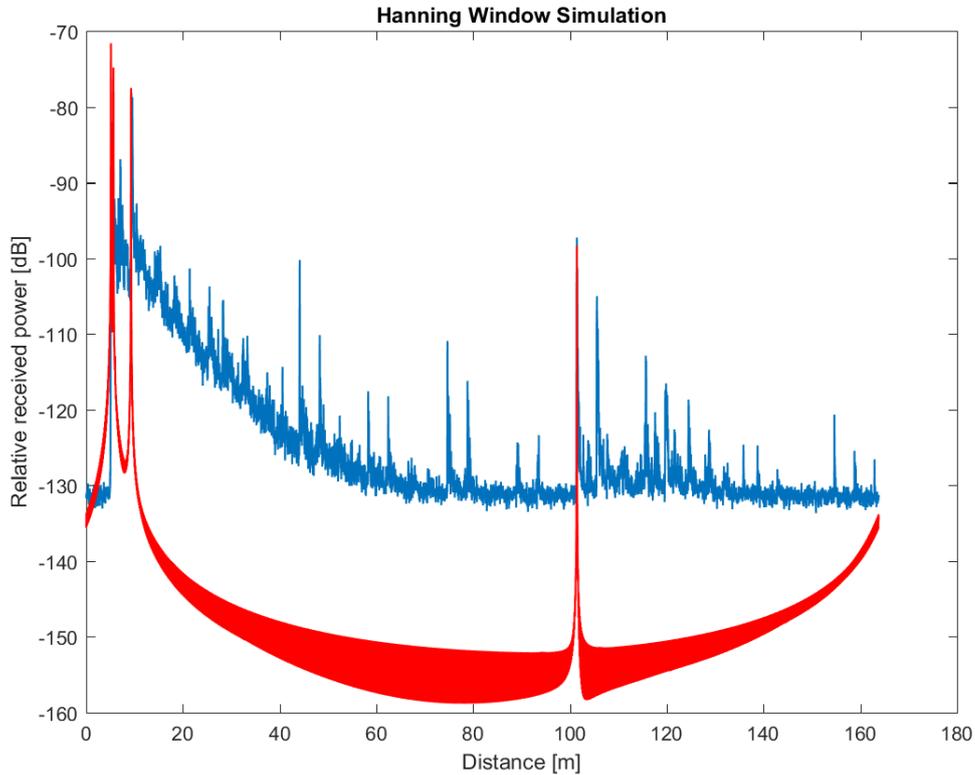


Figura 9. Comparación del PDP medido con el PDP simulado en el escenario uno, posición uno (5m). Una reflexión.

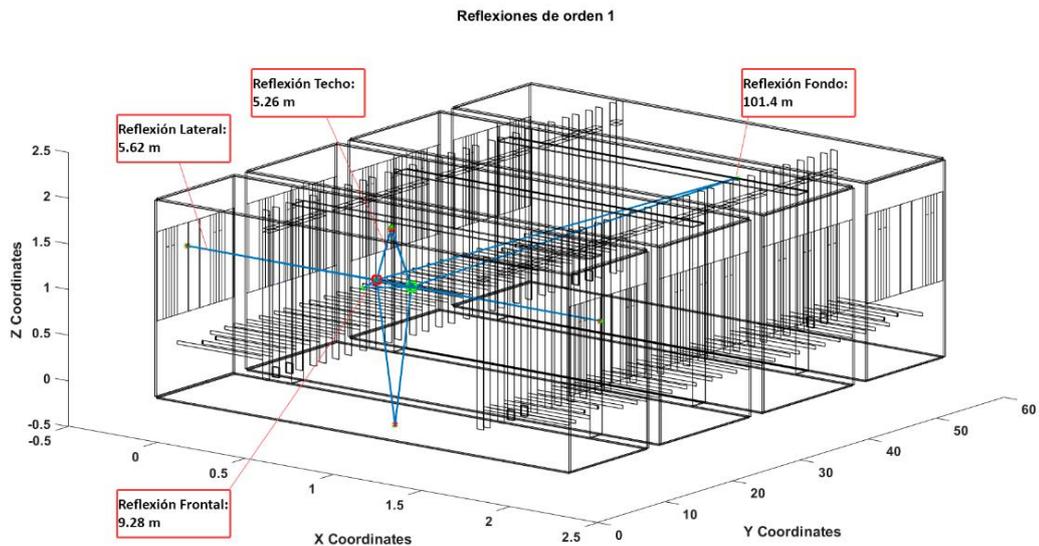


Figura 10. Reflexiones que corresponden a las distintas contribuciones del PDP mostrado en la Figura 9.

En términos de potencia, se observa tanto en la Figura 8 anterior como en la próxima, la Figura 10, cómo las contribuciones simuladas no son exactamente iguales a las medidas. Esto es debido a la imprecisión del entorno modelado, ya que no es exactamente 100% fiel a la realidad. Al realizar un *zoom* entre los 2.5 y 7.5 m, se puede observar con detenimiento las tres contribuciones del primer vagón: el rayo directo, la reflexión en el techo y las reflexiones en las paredes laterales. La reflexión del suelo no se aprecia al atenuarse en el revestimiento del suelo.

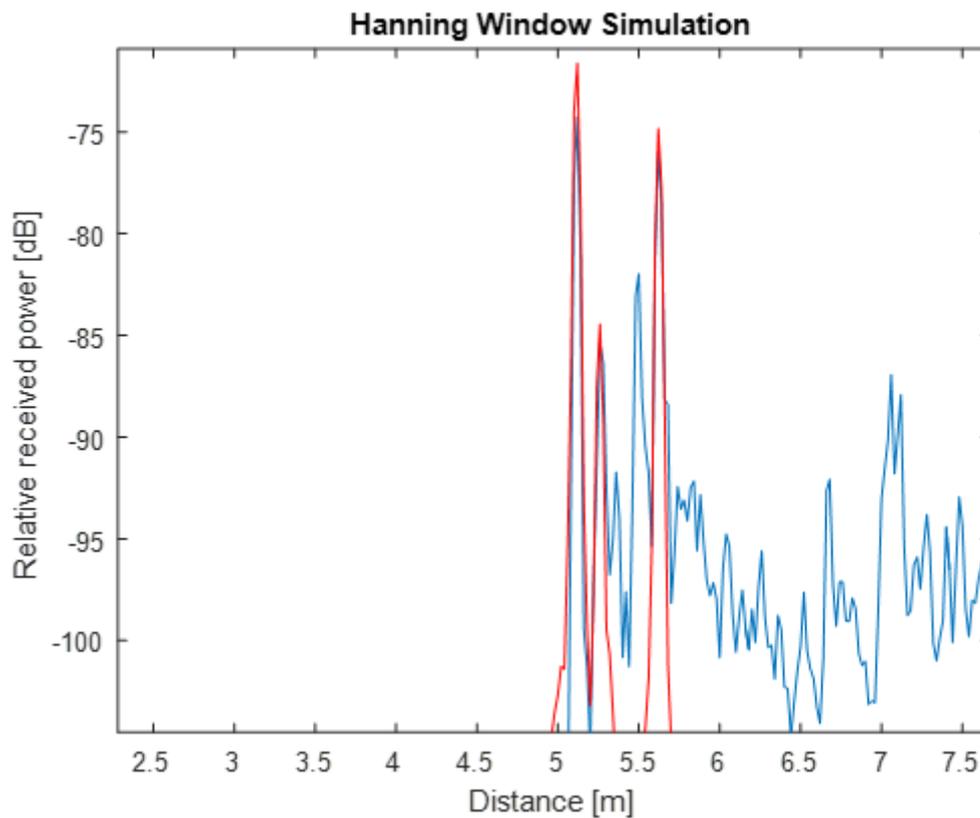


Figura 11. *Zoom* realizado en la Figura 8 entre 2.5 y 7.5 m de distancia.

#### 4.2.1.1.2 Posición ocho

La posición ocho es totalmente opuesta a la anterior. Se puede apreciar en la Figura 11 como también coinciden en distancia las dos contribuciones más importantes de la reflexión. En esta posición es donde más cerca se sitúan las dos contribuciones. En la Figura 12 se observa dónde está la diferencia de recorrido de una y otra respecto a la anterior. En esta posición no se tiene varias contribuciones alrededor del rayo directo ya que se disipan por los obstáculos que atraviesan para alcanzar el transmisor.

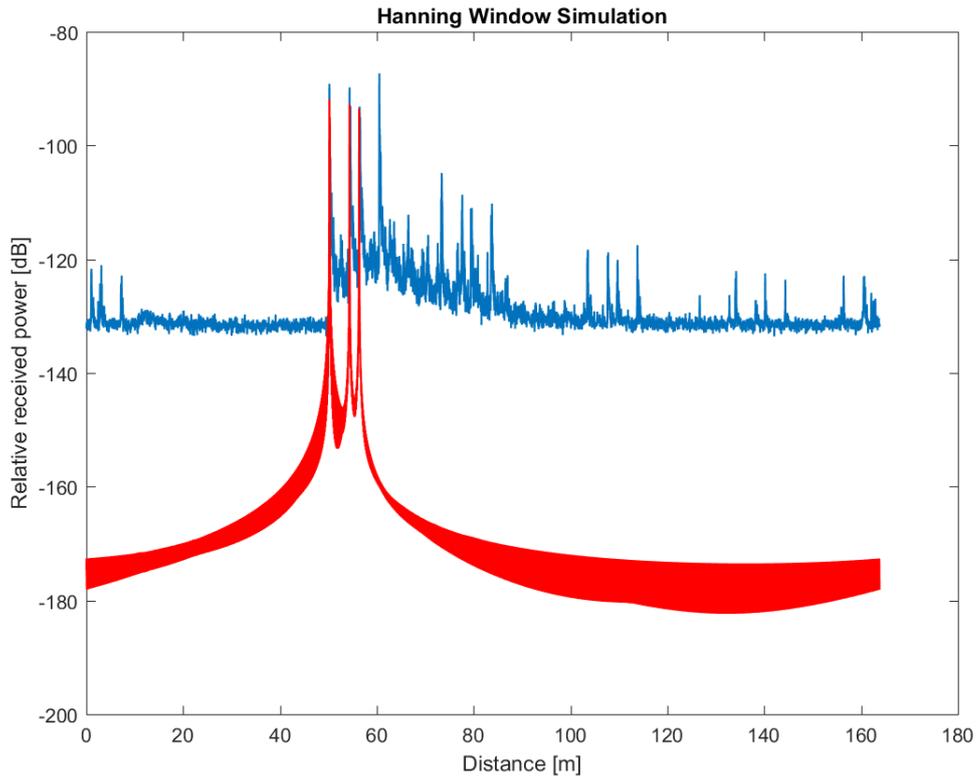


Figura 12. Comparación del PDP medido con el PDP simulado en el escenario uno, posición ocho (50 m). Una reflexión.

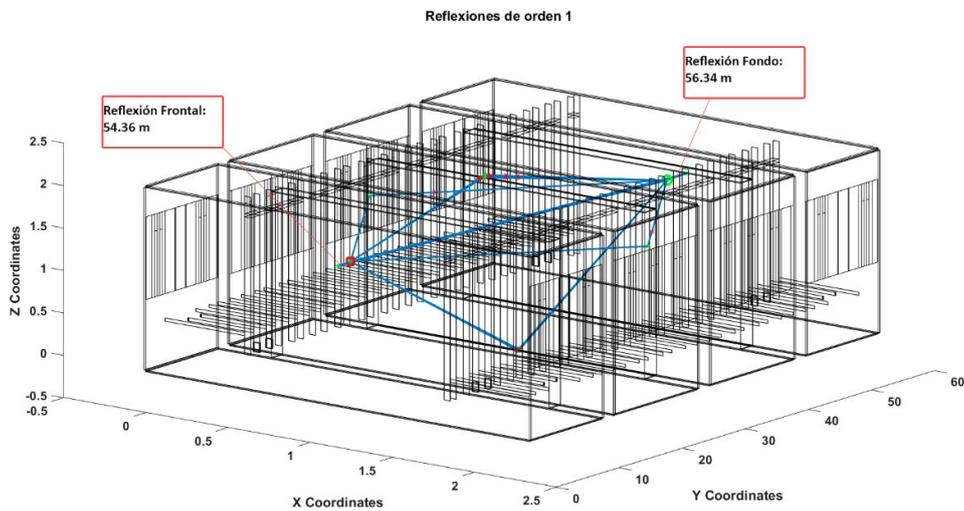


Figura 13. Reflexiones que corresponden a las distintas contribuciones del PDP mostrado en la Figura 12.

Esta vez la potencia es inferior al PDP medido. Esto es debido al mismo motivo que el exceso de potencia enseñado en el apartado anterior; distintas imprecisiones del entorno al no ser 100% fiel a la realidad hacen variar los picos de potencia simulados respecto a los medidos. En el siguiente apartado se mostrará como varían las contribuciones al no estar centrado el transmisor.

#### 4.2.1.2 Escenario dos

##### 4.2.1.2.1 Posición uno

Igual que en el escenario uno, se empieza mostrando la primera posición. Esta vez, el transmisor está más bajo aún y más a cerca de un lateral del vagón, delante de las sillas, como se muestra más adelante en la Figura 15. En este caso, se puede observar en el PDP de la Figura 13 cómo aparecen contribuciones, relacionadas con las reflexiones en la pared frontal y en la del fondo, con bastante más potencia que la medida. Esto es porque, como se indicó en el apartado del entorno modelado, no hemos tenido en cuenta algunos elementos situados al lado de las puertas que podrían afectar.

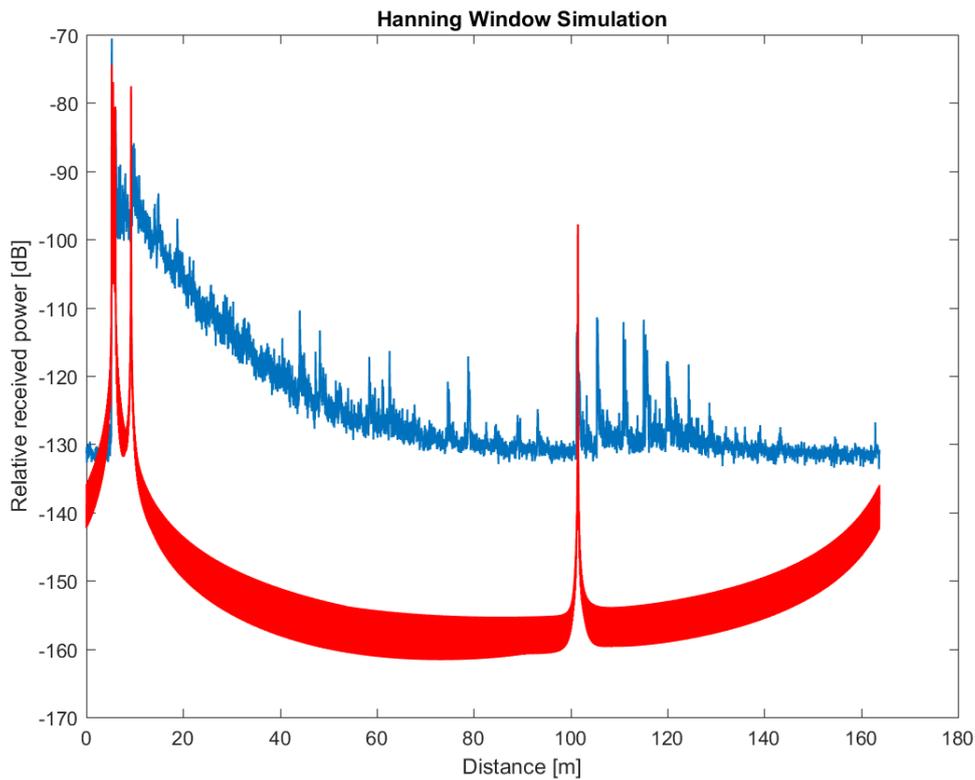


Figura 14. Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario dos, posición uno (5 m). Una reflexión.

Al realizar un *zoom* sobre las distancias entre 5 y 6.5 m, mostrado en la Figura 14, podemos observar las potencias de las diferentes contribuciones que acompañan al rayo directo, tales como las reflexiones laterales, la del techo y la del suelo. Se pueden identificar junto a las distancias sacadas de la Figura 15.

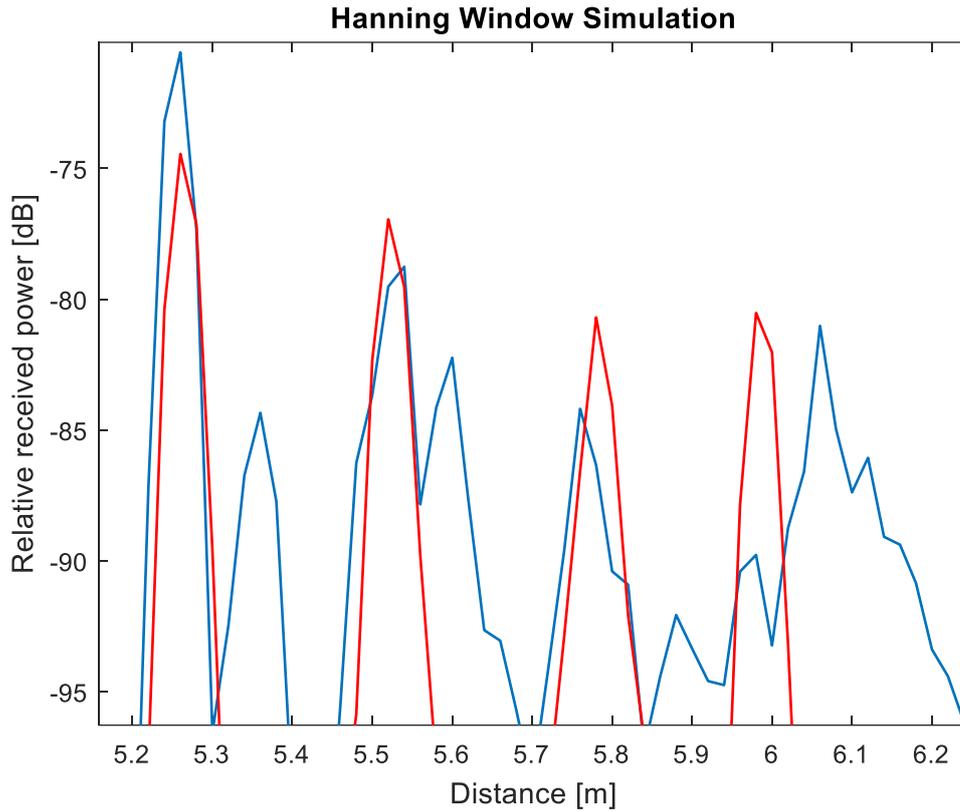


Figura 15. Zoom realizado en la Figura 8 entre 5 y 6.5 m de distancia.

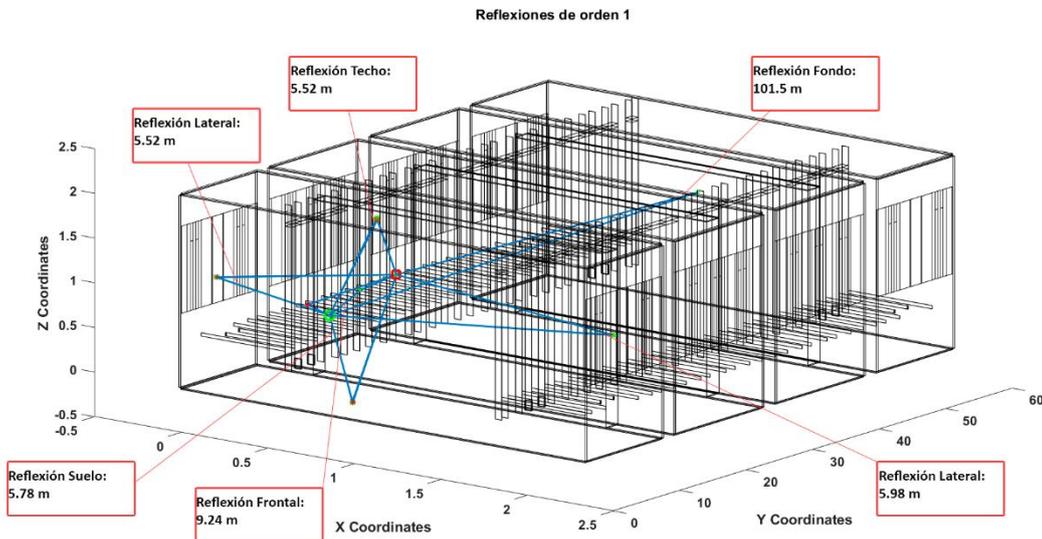


Figura 16. Reflexiones que corresponden a las distintas contribuciones del PDP mostrado en la Figura 14.

#### 4.2.1.2.2 Posición seis

Esta posición seis del segundo escenario es similar a la posición ocho del primero; la distancia entre transmisor y receptor se sitúa sobre los 50 m con la particularidad de que el transmisor está más próximo a un lateral y con una altura de 0.85 m. En la Figura 16 se puede observar como el PDP simulado, a priori, tiene unas potencias mayores del PDP respecto a los simulados. Sin embargo, podemos comprobar en la Figura 17 como, realmente, son valores bastante próximos, aunque una de las reflexiones está ligeramente desplazada.

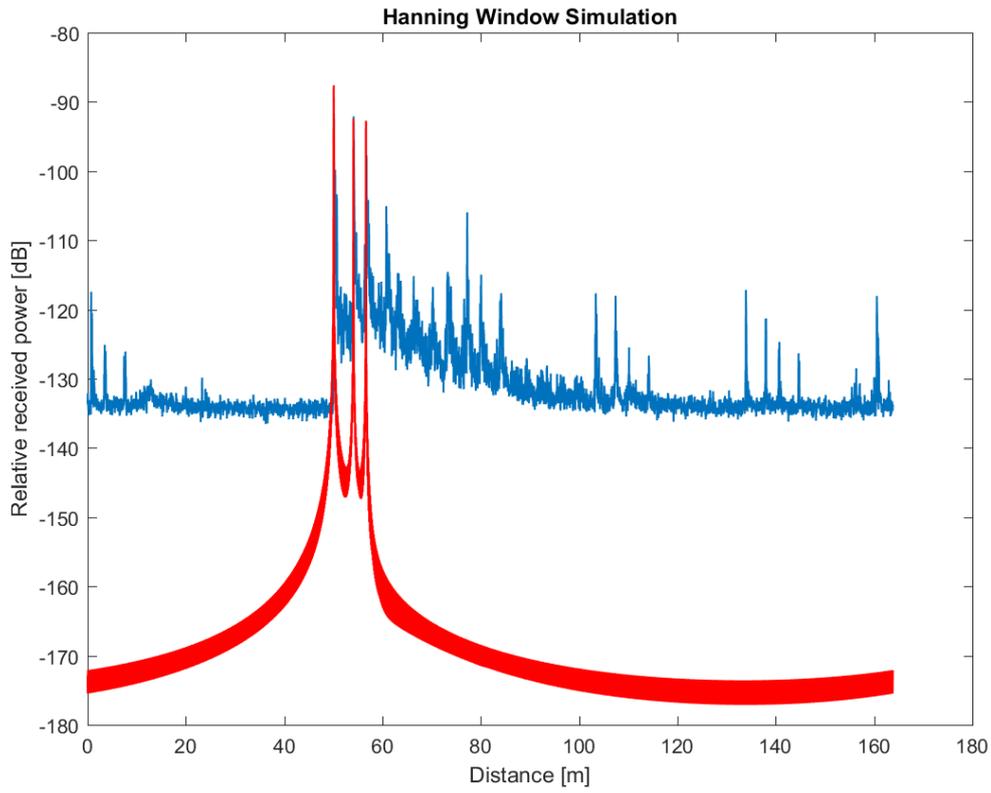


Figura 17. Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario dos, posición seis (50 m). Una reflexión.

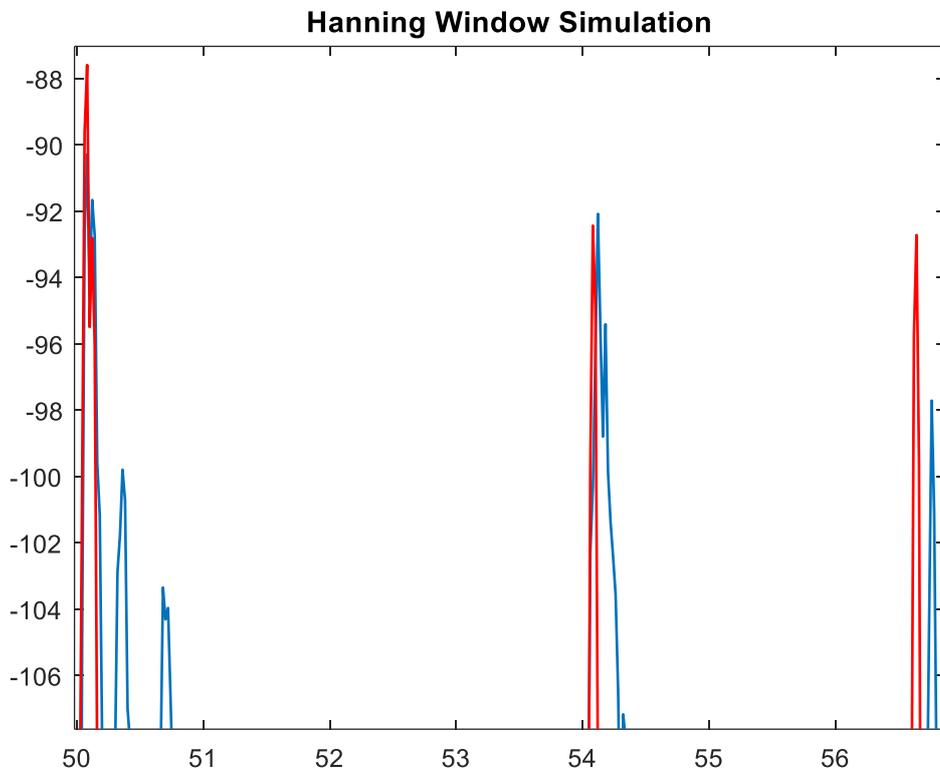


Figura 18. Zoom realizado en la Figura 16 entre 50 y 57 m de distancia.

Por último, en la Figura 18 se puede ver las diferentes reflexiones que actúan en el tren en esta posición. Como vimos en las figuras anteriores, todas ellas se atenúan bastante más y, por ello, sólo se visualiza en la simulación las correspondientes a la pared del fondo y la frontal. Es una situación muy similar a la posición ocho del escenario uno que se enseñó en apartados anteriores.

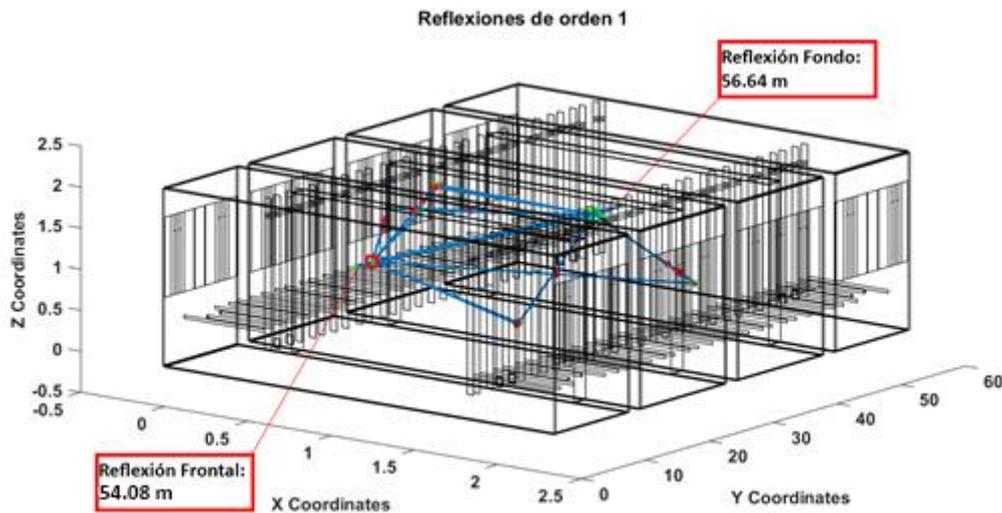


Figura 19. Reflexiones que corresponden a las distintas contribuciones del PDP mostrado en la Figura 17.

Como se puede observar, con una componente de reflexión no se puede obtener una simulación precisa del PDP ya que faltan algunas contribuciones de gran potencia. Se verá que, con dos reflexiones, ya se obtiene una simulación más precisa y con unos resultados aceptables.

#### 4.2.2 Simulaciones con dos reflexiones

En este apartado se procederá a enseñar las simulaciones obtenidas cuando tenemos en cuenta las reflexiones de orden dos. Esta vez, en vez de mostrar solo las dos posiciones de los extremos en cada escenario, se mostrará una tercera posición a una distancia intermedia.

##### 4.2.2.1 Escenario uno

###### 4.2.2.1.1 Posición uno

En la simulación de la posición con dos reflexiones uno se puede observar grandes diferencias respecto a la de una reflexión. En la Figura 19 se muestra cómo aparecen nuevas contribuciones de gran potencia en la parte intermedia del PDP. Sin embargo, la simulación con las barandillas no muestra todas las reflexiones de orden dos. Esto último se puede apreciar en la Figura 20, donde aparece una reflexión más en el PDP sobre los 80 m.

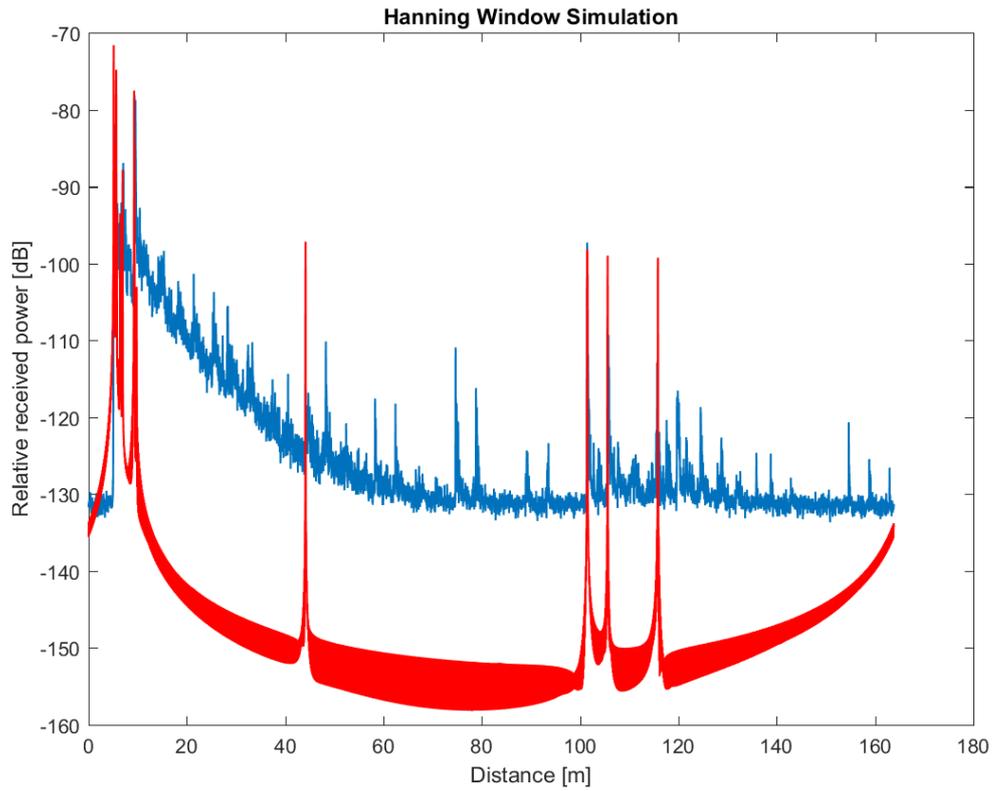


Figura 20. Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario uno, posición uno (5 m). Dos reflexiones.

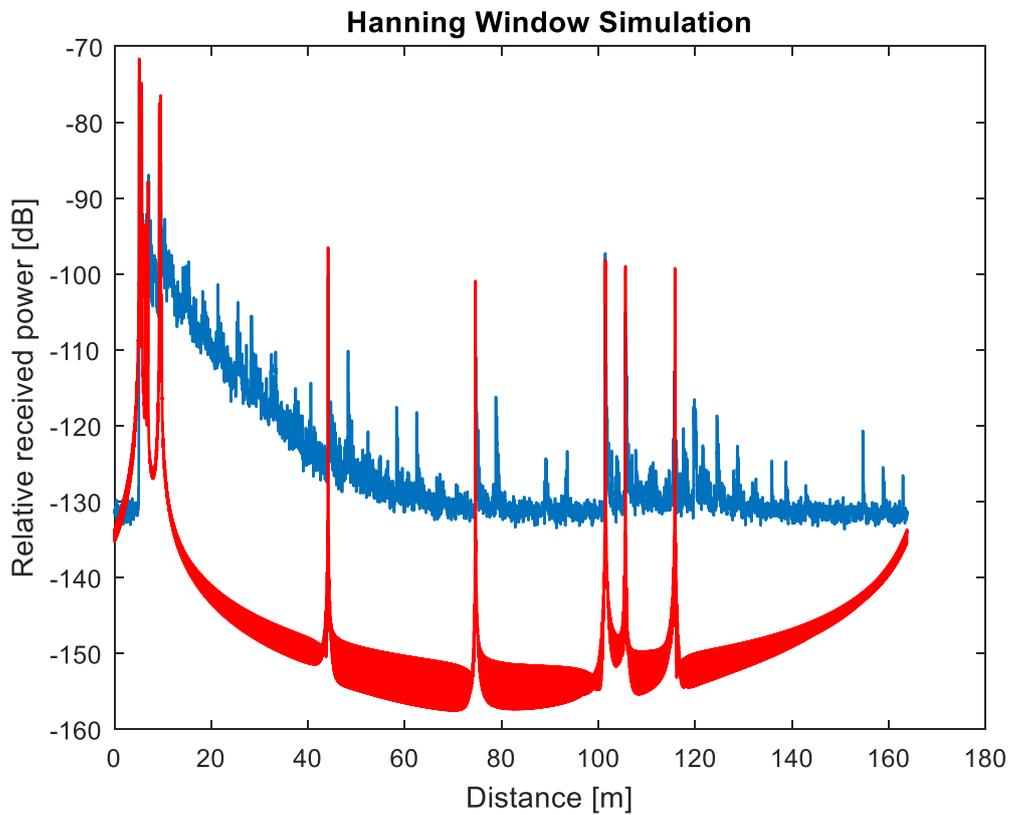


Figura 21. Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario uno, posición uno (5m). Dos reflexiones. Sin barandillas.

Las reflexiones más importantes, obviando las de orden uno que se mostraron en apartados anteriores, son las dos que hacen reflexión en la pared del fondo y en la frontal a la vez, las que lo hacen en las paredes del fondo de cada vagón individualmente y, dentro del primer vagón donde se sitúan transmisor y receptor, las que hacen reflexión en las dos paredes laterales y en la frontal y un lateral. Todo esto se puede apreciar en la Figura 21, donde aparecen todas las reflexiones de orden dos y se puede observar el recorrido de los rayos.

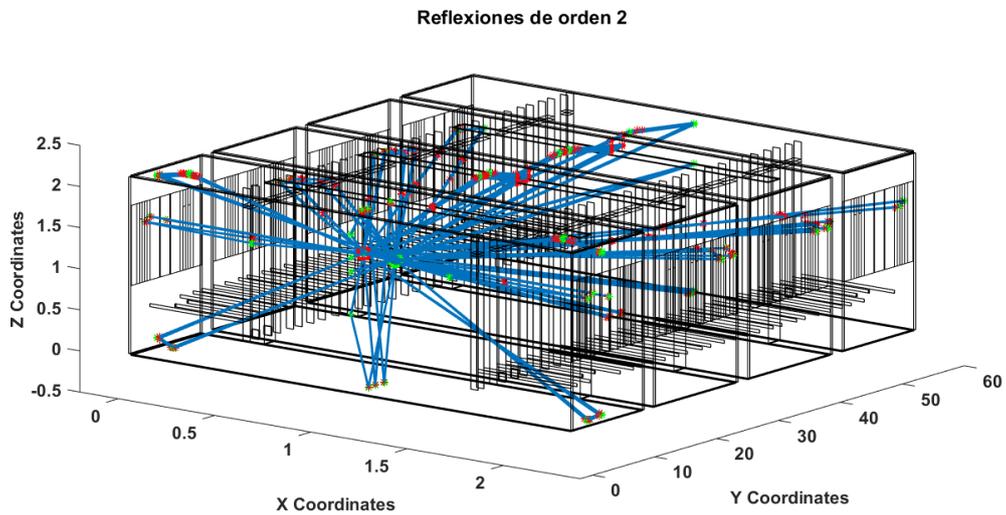


Figura 22. Reflexiones que corresponden a las distintas contribuciones del PDP mostrado en la Figura 20.

#### 4.2.2.1.2 Posición cuatro

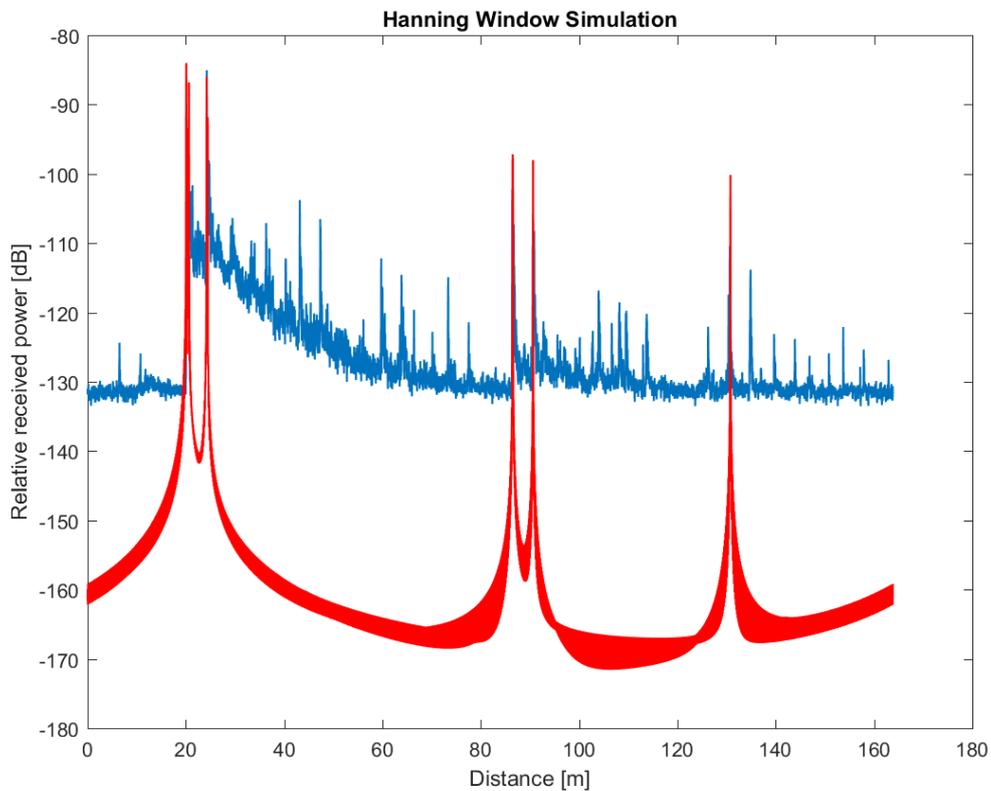


Figura 23. Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario uno, posición cuatro (20 m). Dos reflexiones.

Esta posición corresponde con la posición del transmisor a 20 m del receptor. Por tanto, se encuentra prácticamente en el centro del tren. En la Figura 22 se muestran las reflexiones que actúan en esta posición. Como se puede apreciar, no actúan las reflexiones en las paredes de los vagones del tren como en otras posiciones. Las reflexiones que aparecen son las que actúan sobre la pared del fondo y la frontal. En la Figura 23 se enseña los rayos que actúan.

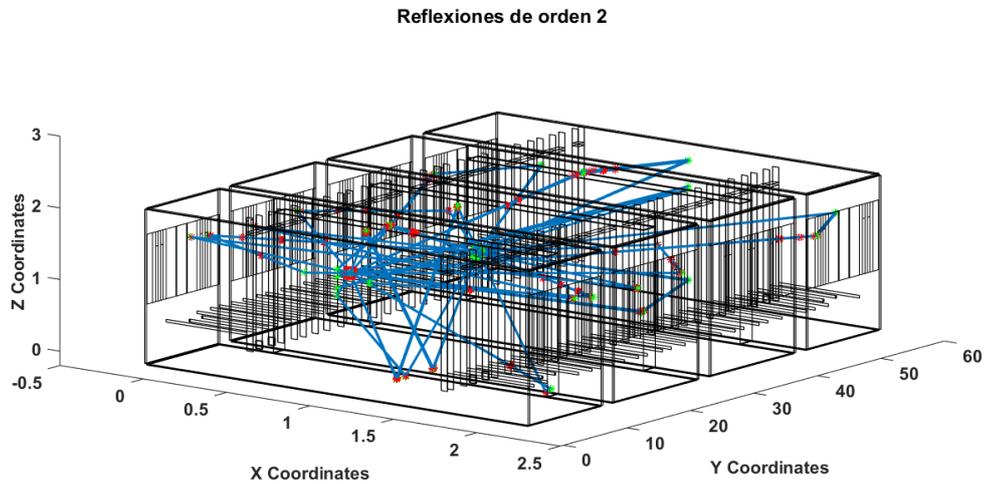


Figura 24. Reflexiones que corresponden a las distintas contribuciones del PDP mostrado en la Figura 23.

#### 4.2.2.1.3 Posición ocho

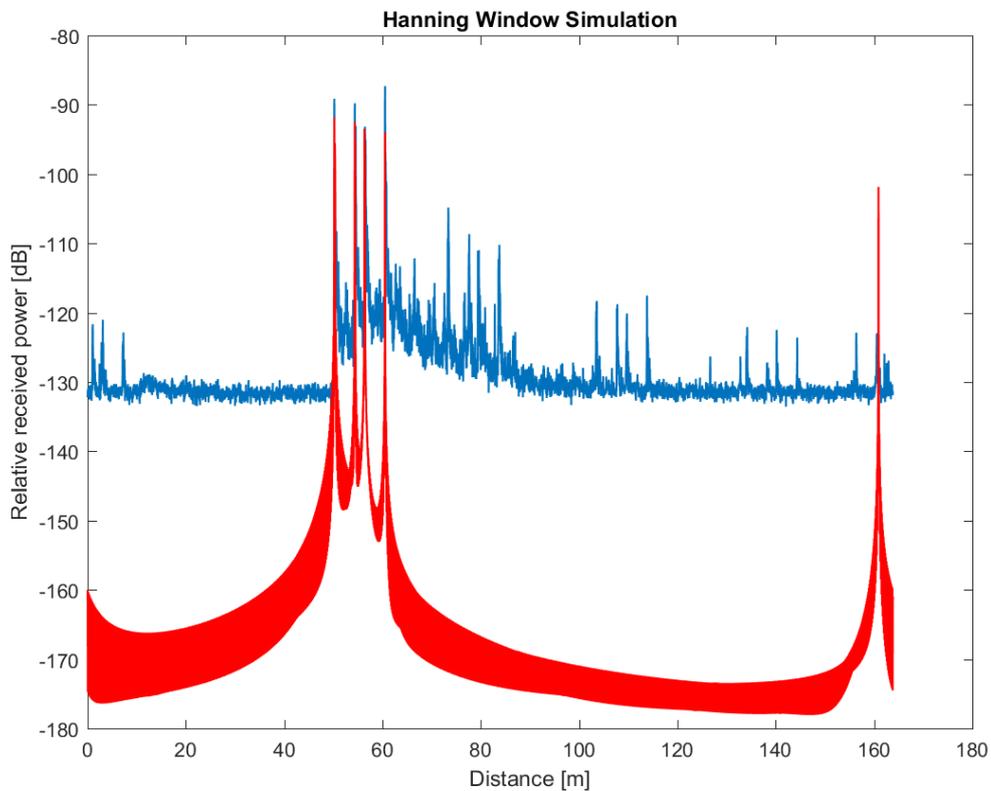


Figura 25. Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario uno, posición ocho (50 m). Dos reflexiones.

Esta posición corresponde con una distancia entre transmisor y receptor de 50 m. A diferencia de cuando había sólo una reflexión, se puede apreciar en la Figura 24 cómo aparecen dos contribuciones más: una sobre los 60 y 70 m y otra por los 160 m. Estas, como en las demás, se corresponden con las reflexiones que interactúan con la pared del fondo y la frontal. La contribución simulada más alejada tiene una potencia bastante mayor que la medida. Esto puede ser producido por el material del que está constituido la pared. La pared está hecha en el entorno con un único material; cabe la posibilidad de que haya elementos en esa pared que hagan reducir esa contribución.

Se ve como en esta posición hay varias reflexiones realizándose, en la Figura 25, pero todas atraviesan varios elementos y se atenúan en el modelo. Es por esto por lo que solo las reflexiones que viajan por el centro del tren, utilizando la pared frontal y la del fondo, son las que aparecen en la simulación.

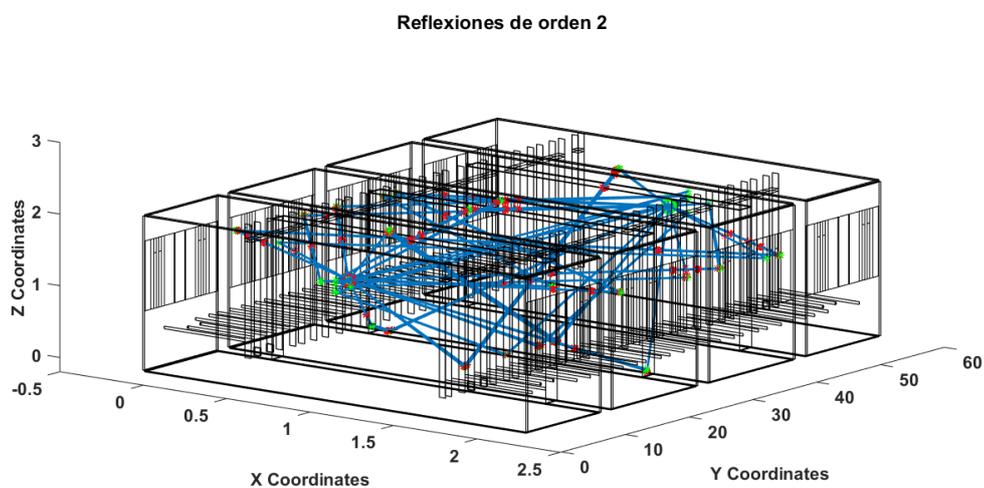


Figura 26. Reflexiones que corresponden a las distintas contribuciones del PDP mostrado en la Figura 25.

#### 4.2.2.2 Escenario dos

##### 4.2.2.2.1 Posición uno

En esta posición aparecen bastantes contribuciones nuevas respecto a la gráfica con una reflexión solo. Estas contribuciones aparecen entre los 20 y 40 metros y son producidas por los mismos motivos que en el escenario uno: las reflexiones en las paredes del fondo de los vagones intermedios. Se puede observar en la Figura 26 todo lo mencionado.

En términos de potencia se puede observar también, en la Figura 26, que las contribuciones superan la potencia del PDP medido. Esto es, como en las demás situaciones, debido a las imprecisiones del entorno y la falta de algunos elementos. En la Figura 27 se observa qué rayos son los que interactúan en este PDP. La mayoría son atenuados de tal manera que no salen en la gráfica o, en otros casos, coinciden en distancia recorrida con otros rayos, al no atenuarse, y se acumulan formando reflexiones que, según el PDP medido, no deberían estar.

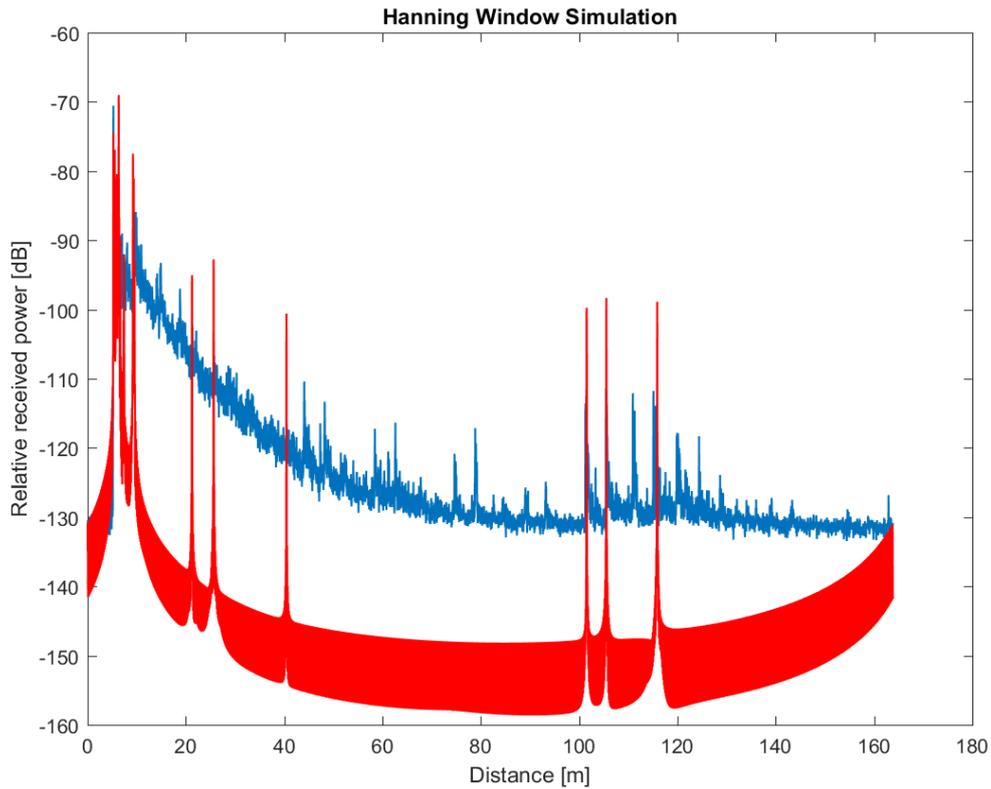


Figura 27. Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario dos, posición uno (5 m). Dos reflexiones.

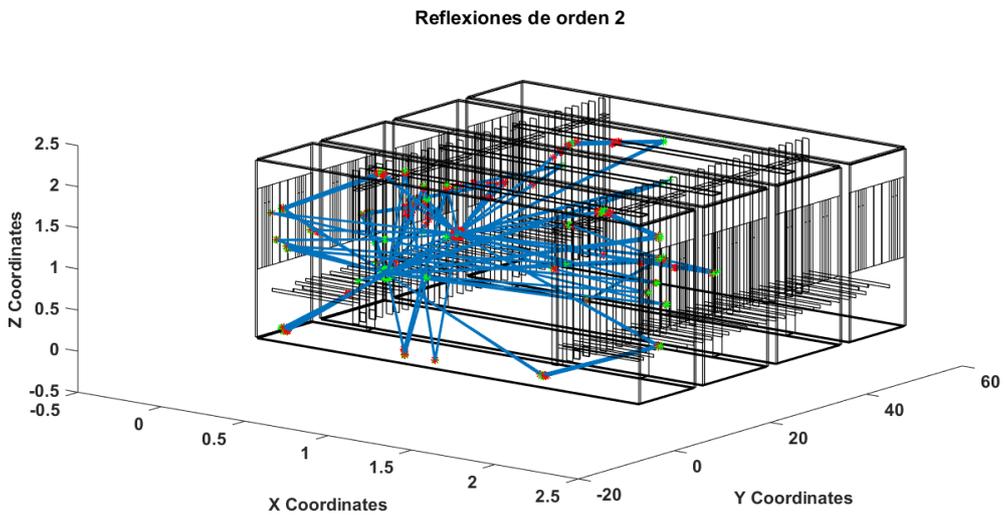


Figura 28. Reflexiones que corresponden a las distintas contribuciones del PDP mostrado en la Figura 27.

#### 4.2.2.2.2 Posición tres

La posición tres corresponde a una distancia entre transmisor y receptor de 20 m. Al igual que la posición cuatro del escenario uno, el transmisor se sitúa aproximadamente en el centro del tren. Por ello, es bastante similar a los resultados obtenidos en la simulación del PDP en la posición cuatro del escenario uno. En la siguiente imagen, la Figura 28, se puede apreciar.

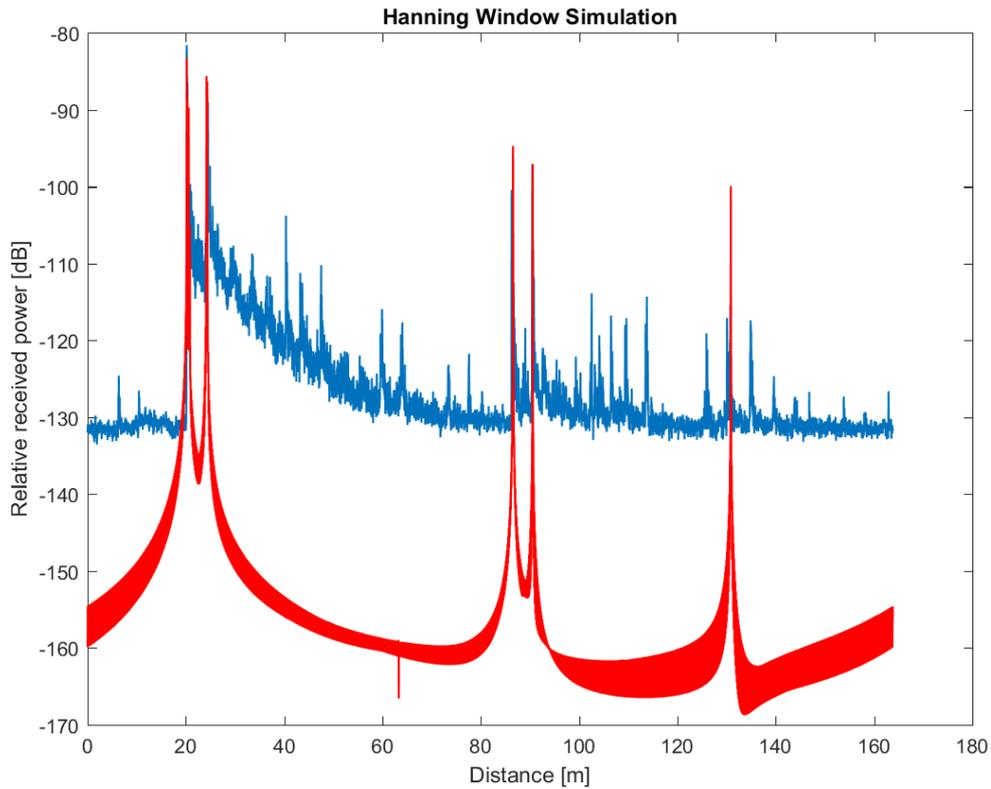


Figura 29. Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario dos, posición tres (20 m). Dos reflexiones.

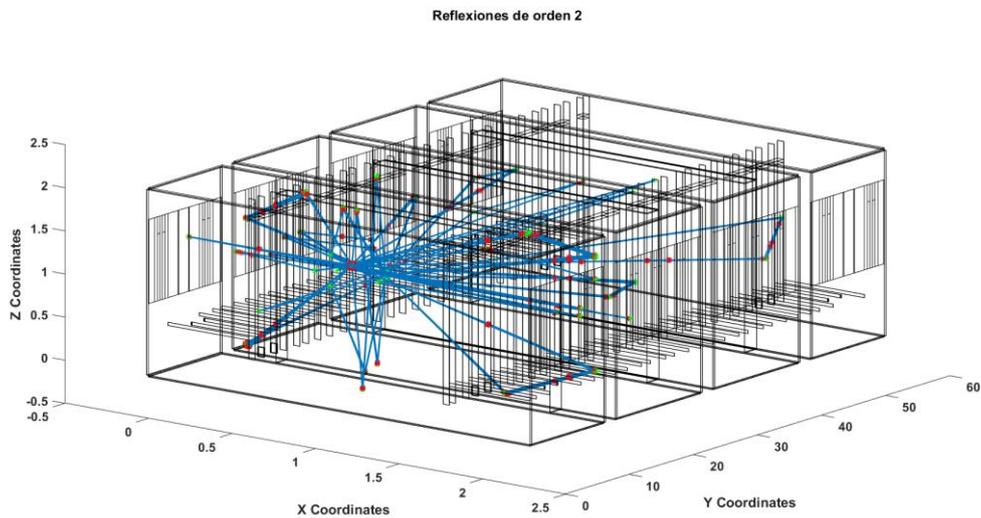


Figura 30. Reflexiones que corresponden a las distintas contribuciones del PDP mostrado en la Figura 29.

Como en todas las posiciones hasta ahora, la mayoría de las reflexiones son atenuadas hasta el punto de no aparecer en la gráfica del PDP simulado o están reunidas en una misma distancia recorrida. Lo segundo es lo que ocurre en esta situación, ya que todas las contribuciones, mostradas en la Figura 29, están concentradas en los picos representados en la Figura 28 anteriormente mostrada.

#### 4.2.2.2.3 Posición seis

La posición seis de este escenario al simular dos reflexiones, en la Figura 30 representada, es prácticamente igual que cuando se simulaba una reflexión, salvando la aparición de las contribuciones de más de 60 m. Al igual que en otros apartados, la mayoría de las reflexiones se acumulan en una misma distancia recorrida o, directamente, son atenuadas. La primera contribución de más de 60 m, la de 60.33 m, es producida por la acumulación de reflexiones de este mismo valor que acaba chocando en la pared frontal o la del fondo. La segunda, situada en 160 m, es producida por la única reflexión que hay en la que el rayo acaba chocando en las dos paredes recorriendo la distancia del tren tres veces. En la Figura 31 se aprecian todas estas reflexiones.

El exceso de potencia es sabido que puede ser producido por la imperfección del entorno. Sin embargo, al igual que en la posición ocho del escenario uno, esta posición presenta en su contribución más alejada una gran potencia simulada respecto a la medida. Igual que en la posición anteriormente mencionada, puede ser debido a la presencia de algún material que atenúe, en uno de los dos puntos donde choca, de manera diferente al resto de la pared.

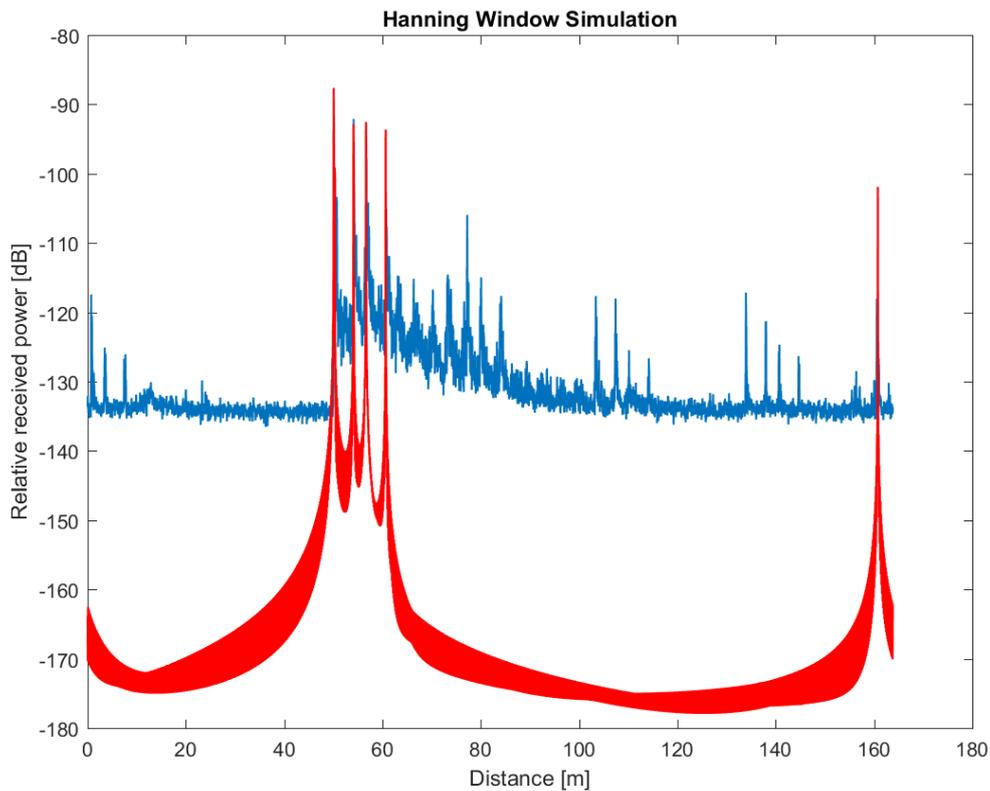


Figura 31. Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario dos, posición seis (50 m). Dos reflexiones.

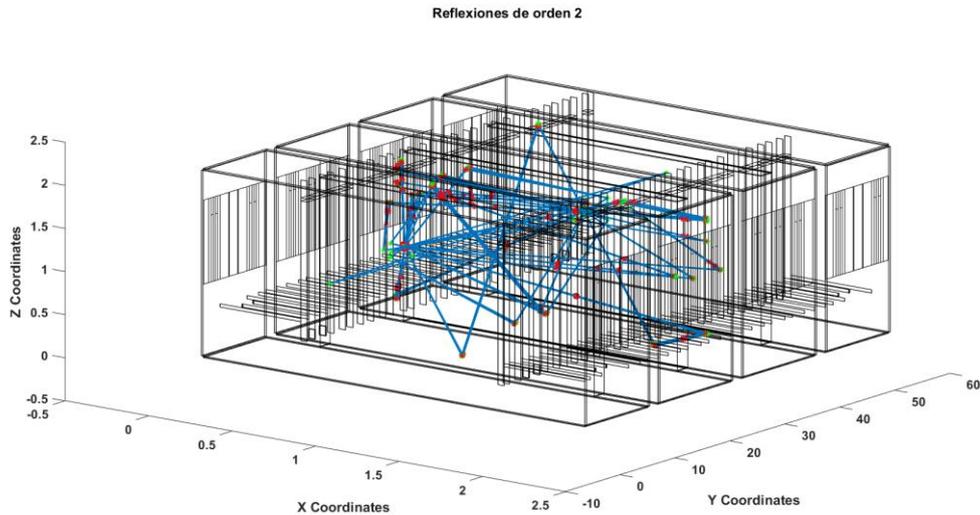


Figura 32. Reflexiones que corresponden a las distintas contribuciones del PDP mostrado en la Figura 31.

### 4.2.3 Simulación con dos reflexiones y difracción

En los apartados anteriores se mostró brevemente, enseñando dos o tres posiciones por escenario, cómo funcionaba la simulación en las reflexiones de orden uno y dos. Éstas son las contribuciones más potentes de la gráfica del PDP que se han logrado conseguir y que, como se verá más adelante, son las más importantes a la hora de realizar los cálculos. El hecho de representar la difracción y, posteriormente representado en las simulaciones completas, el efecto de difusión tiene la finalidad de mostrar cómo funciona el entorno a la hora de querer realizar simulaciones mucho más completas y precisas. Es por ello por lo que, en este apartado, se enseñará sólo dos posiciones por escenario, mostrando la evolución de la difracción en función de la distancia que separa el transmisor y el receptor.

Cabe destacar que, debido a la imperfección del entorno y, además, de la ausencia de elementos para mejorar el tiempo de ejecución, la difracción puede afectar positivamente en la simulación o negativamente. En el apartado de Análisis Cuantitativo se explica con mayor detalle como afecta la difracción a las simulaciones del entorno.

#### 4.2.3.1 Escenario uno

##### 4.2.3.1.1 Posición uno

Como en todos los apartados, la posición uno representa el punto de partida. Es donde, al fin y al cabo, el transmisor y receptor se sitúan más cerca. Como se aprecia en la Figura 32, el efecto de difracción es bastante más potente de lo que debería y, además, no presenta la misma bajada que en el PDP medido. La difracción, al depender de los elementos que se encuentran en medio, puede ser que no se vea reflejada de manera precisa al haberse eliminado éstos para reducir el tiempo de ejecución. Se puede comprobar que incluso afecta en algunas distancias concretas donde reduce su potencia y disimula reflexiones de orden dos, como en la reflexión en el fondo de la pared el vagón dos situada entre los 40 y 50 m.

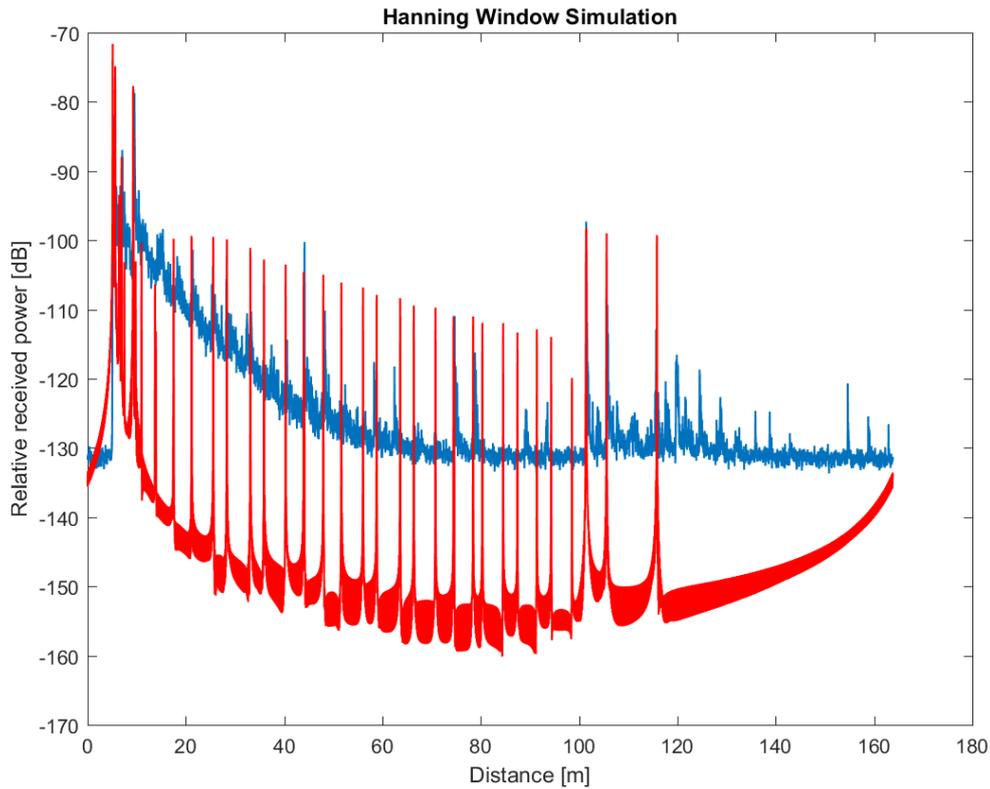


Figura 33. Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario uno, posición uno (5 m). Dos reflexiones más difracción.

#### 4.2.3.1.2 Posición ocho

A diferencia de la posición anterior, en la posición ocho la difracción parece disimularse más hasta el punto de parecer inexistente. Parece, de hecho, que solo hay un par de contribuciones entre los 50 y los 60 m, como se puede apreciar en la Figura 33.

Sin embargo, lo que realmente ocurre es que la difracción se está concentrando entre los 50 y 55 m, aumentando la potencia en esos valores de distancia recorrida. Se puede ver una comparación entre el PDP con dos reflexiones sin difracción y el PDP con difracción donde se aprecia perfectamente en la Figura 34.

Esto afecta de manera negativa a la simulación, ya que, como se explicó anteriormente, la difracción tiene unos valores de potencia mayores a los que deberían ser y, además, no se reduce a lo largo de la distancia recorrida como en el PDP medido. Por tanto, en este caso, la difracción reduce la precisión de la simulación en vez de aportar más información.

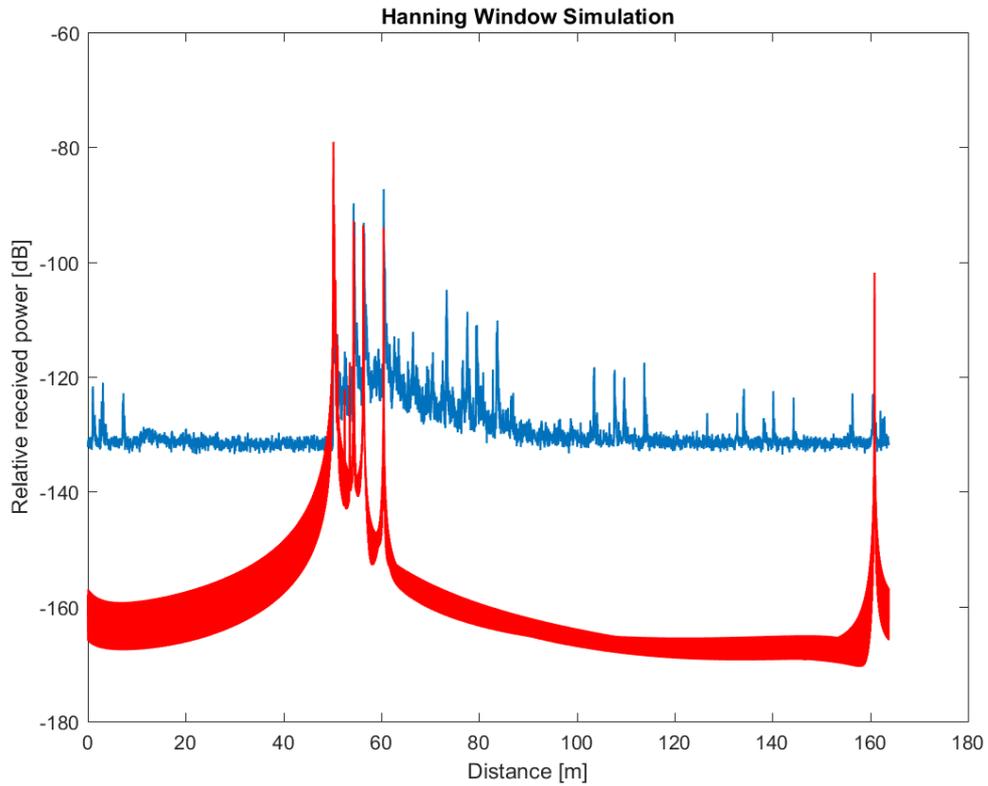


Figura 34. Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario uno, posición ocho (50 m). Dos reflexiones más difracción.

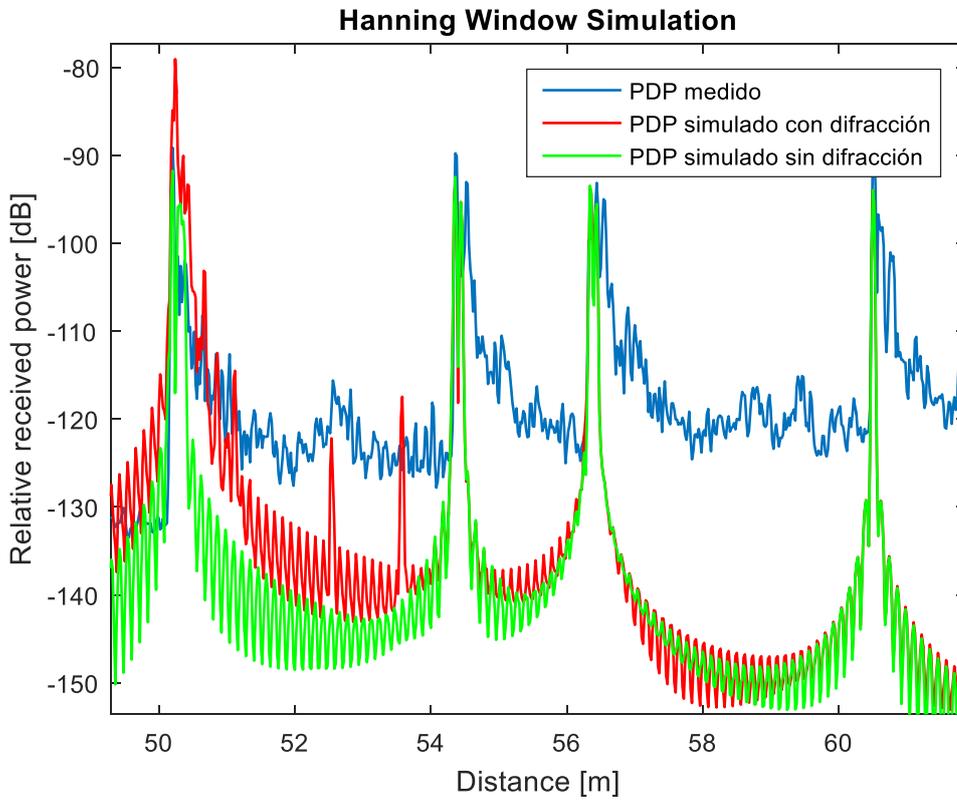


Figura 35. Comparación, con *zoom* entre los 50 y 60 m, del PDP medido con el PDP simulado con dos reflexiones y con el PDP simulado con dos reflexiones más difracción en escenario uno, posición ocho (50 m).

### 4.2.3.2 Escenario dos

#### 4.2.3.2.1 Posición uno

Al igual que en el escenario uno, la difracción en la posición uno reduce las contribuciones de algunas reflexiones que chocan con elementos en medio del vagón, no se reduce la difracción junto a la distancia recorrida de la misma manera que el PDP medido y sus potencias son bastante más altas. Reafirma el hecho de que la difracción en las simulaciones hay que estudiarlo más detenidamente para que las simulaciones, cualitativamente hablando, sean más precisas. En la Figura 35 se muestra el PDP simulado junto al medido para corroborar lo mencionado.

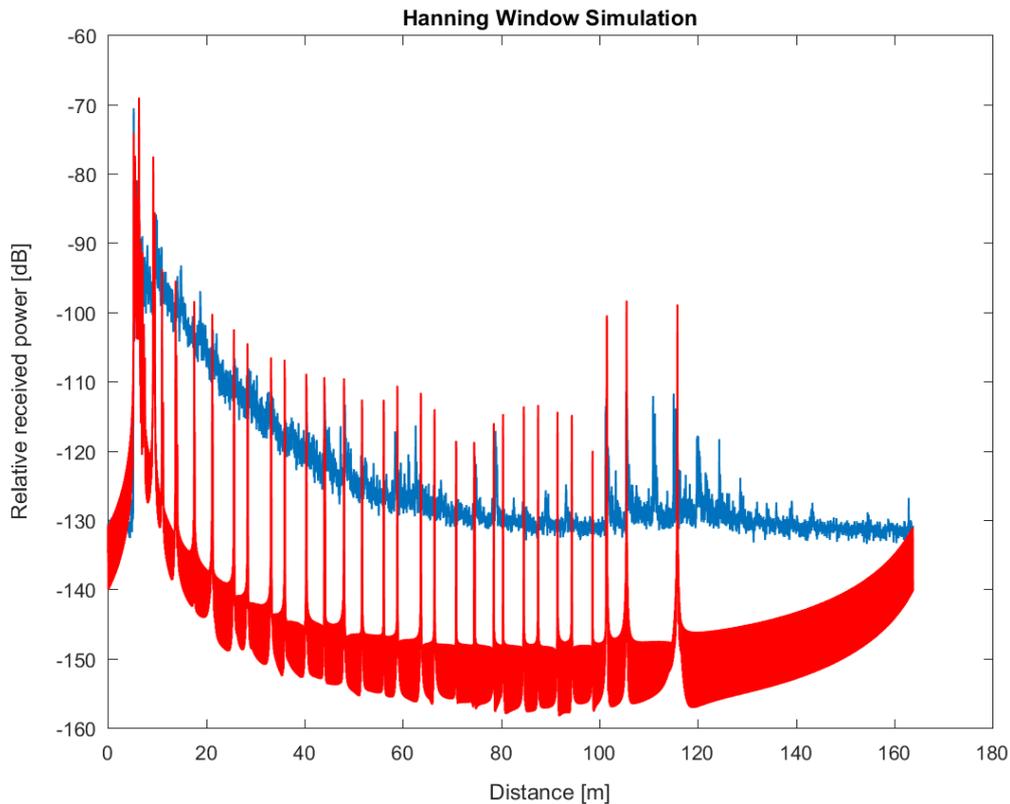


Figura 36. Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario dos, posición uno (5 metros). Dos reflexiones más difracción.

#### 4.2.3.2.2 Posición seis

En la posición ocho del escenario uno hizo falta comparar los PDP con dos reflexiones con y sin difracción. Sin embargo, en este escenario, no hace falta compararlos. Observando la Figura 36 parece que, en cuanto a contribuciones independientes, no hay difracción; pero se puede apreciar como las contribuciones cercanas al rayo directo, sobre los 50 m, son bastante mayores que en la simulación sin difracción.

Al igual que en el escenario uno, esto acabará afectando negativamente en la precisión de la simulación reduciéndola de manera considerable.

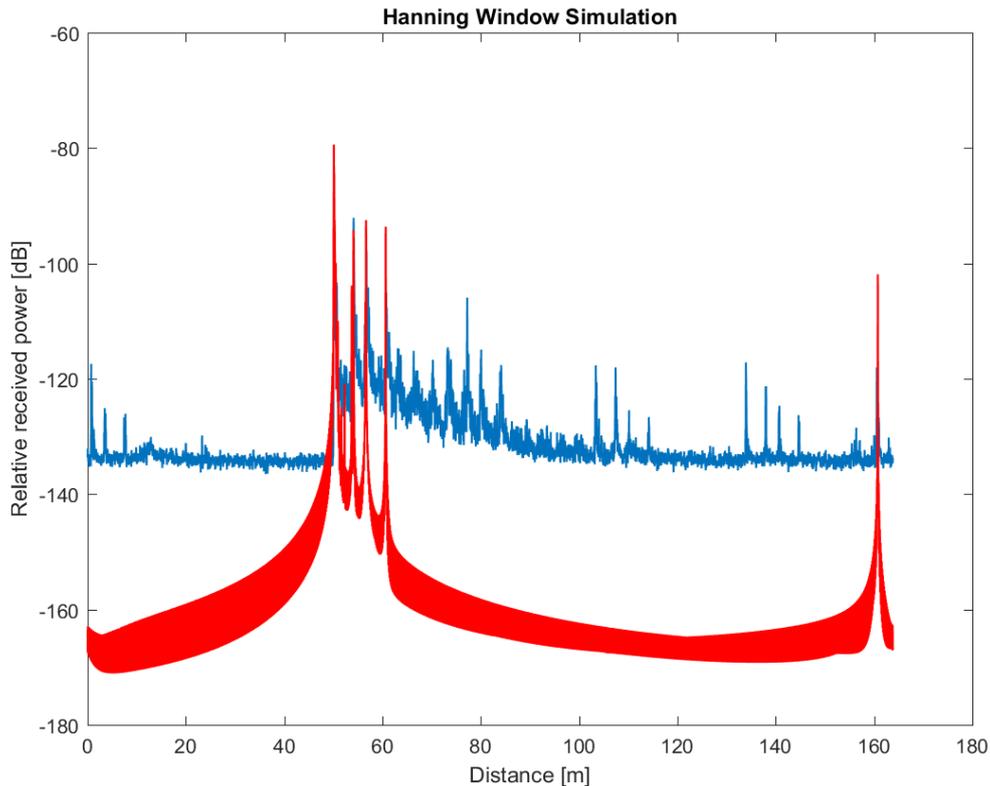


Figura 37. Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario dos, posición seis (50 metros). Dos reflexiones más difracción.

#### 4.2.4 Simulaciones completas con dos reflexiones, difracción y difusión

En este apartado se pretende mostrar las simulaciones de todas las posiciones realizadas con todos los mecanismos de propagación disponibles. Se ha explicado ya, en apartados anteriores, cómo afecta a la simulación cada uno de ellos a excepción del efecto de difusión.

El efecto de difusión se ha simulado con un valor de difusión  $S$  constante para todos los elementos de 0.5 y con una distancia entre cada punto de difusión de  $20\lambda$ . Se ha utilizado un valor constante de  $S$  debido a la imprecisión del entorno. El valor de distancia de  $20\lambda$  es introducido para que todos los elementos relacionados con las paredes del tren presenten este fenómeno sin afectar tanto al tiempo de computación.

Se puede apreciar en todas las figuras a continuación mostradas observando la caída que se produce en los primeros valores de distancia recorrida. Conforme ésta aumenta, el efecto de difusión desaparece.

Todas las figuras mostradas, desde la XX hasta la XX, muestran los resultados completos para cada una de las posiciones dadas al principio del apartado de Análisis Cualitativo. Gracias a los apartados anteriores desglosados, se puede apreciar los diferentes mecanismos de propagación sin entrar en detalles en cada posición.

#### 4.2.4.1 Escenario 1

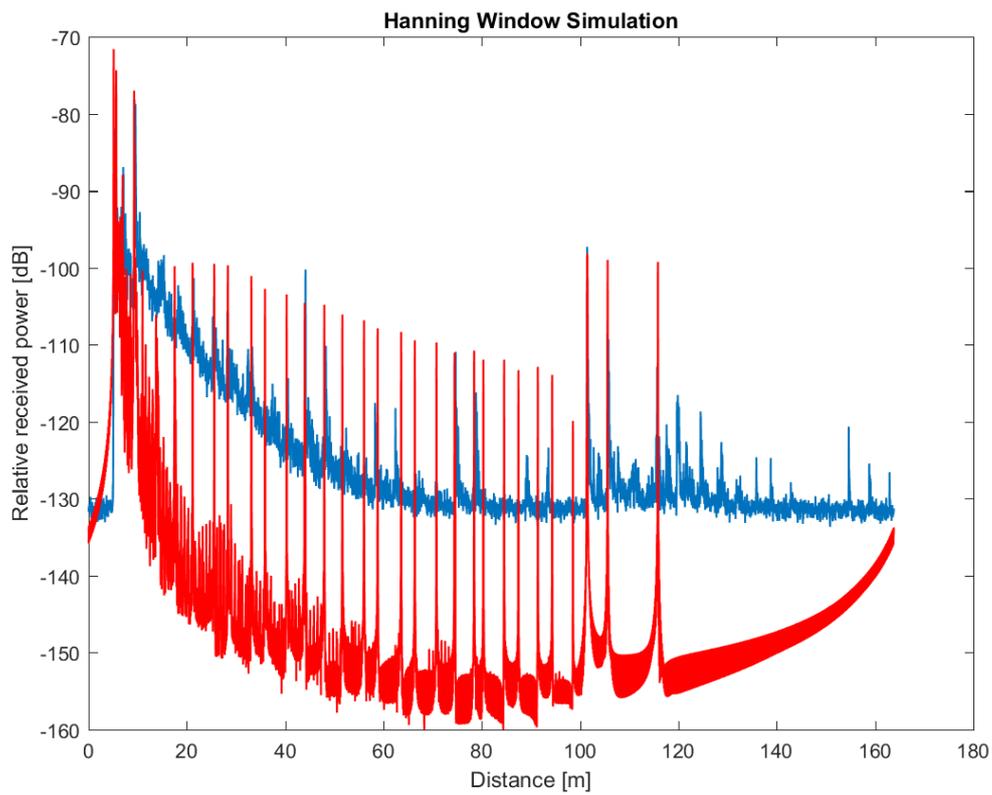


Figura 38. Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario uno, posición uno (5 m). Completo.

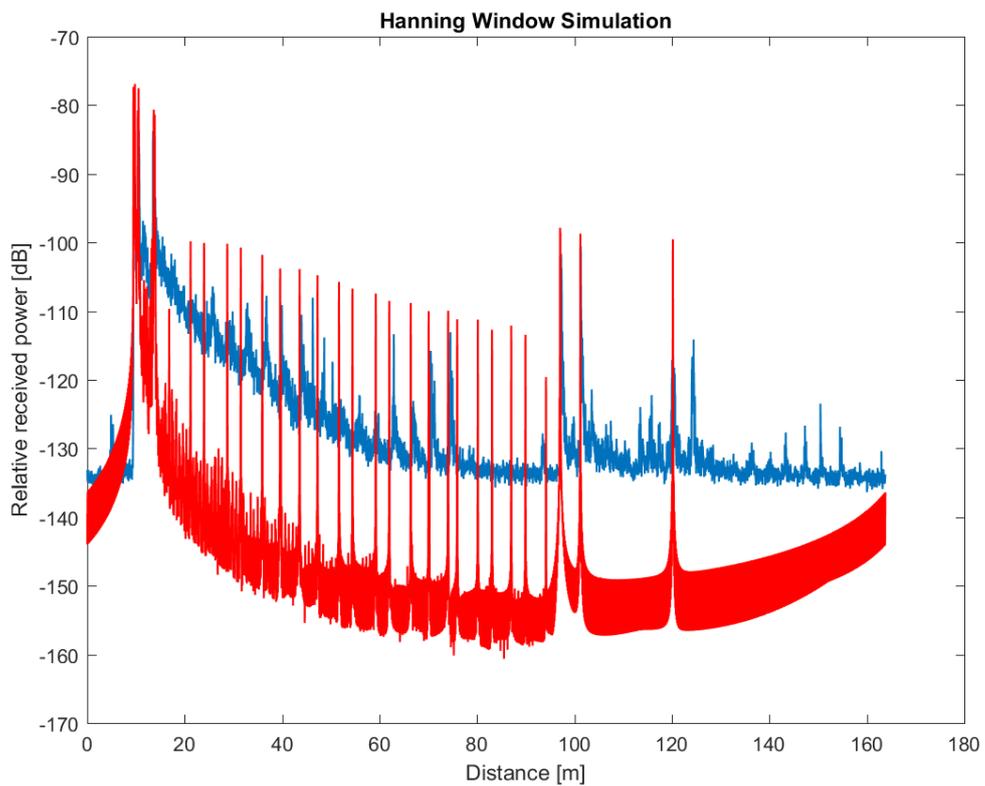


Figura 39. Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario uno, posición dos (10 m). Completo.

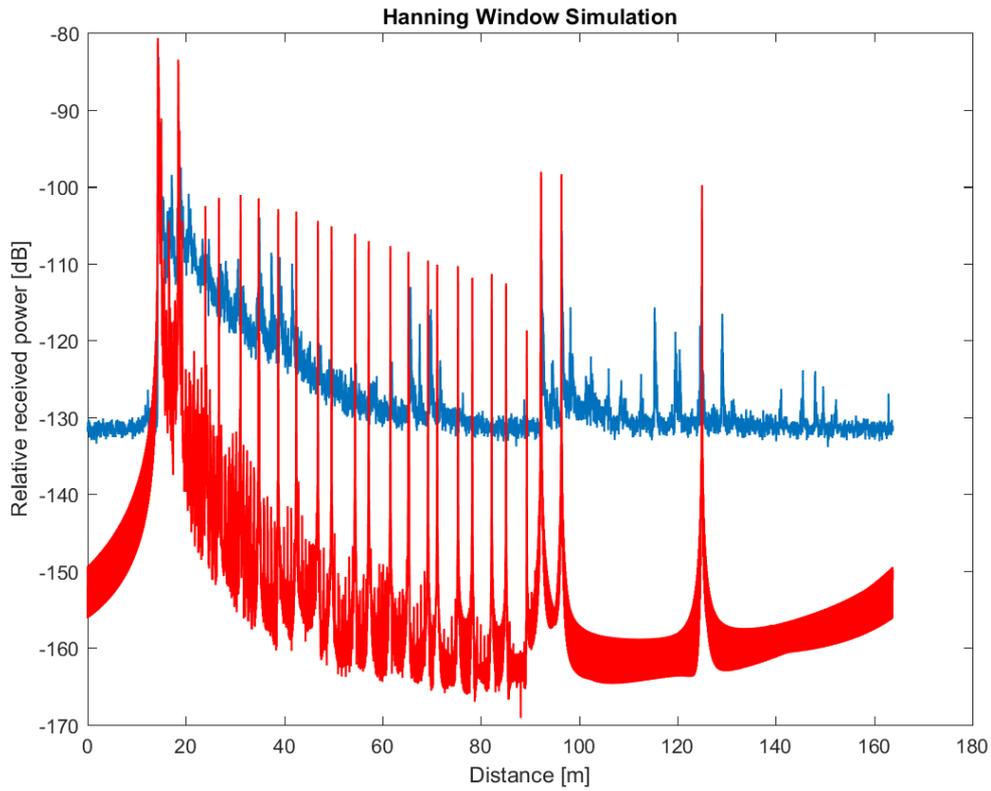


Figura 40. Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario uno, posición tres (15 m). Completo.

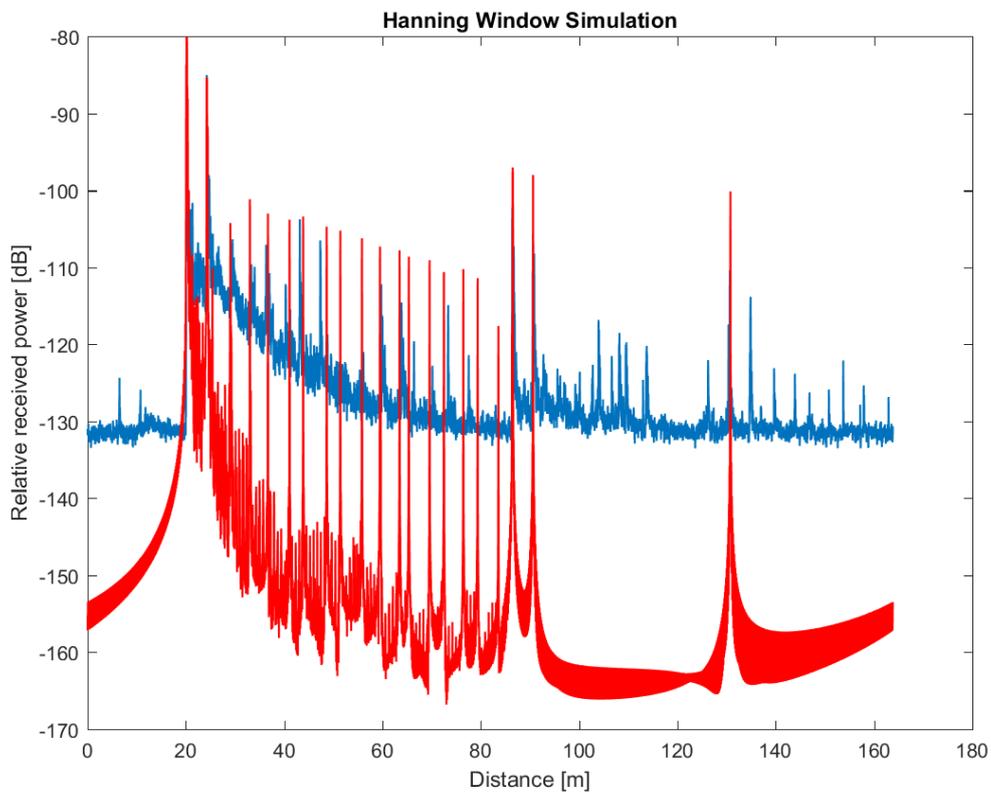


Figura 41. Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario uno, posición cuatro (20 m). Completo.

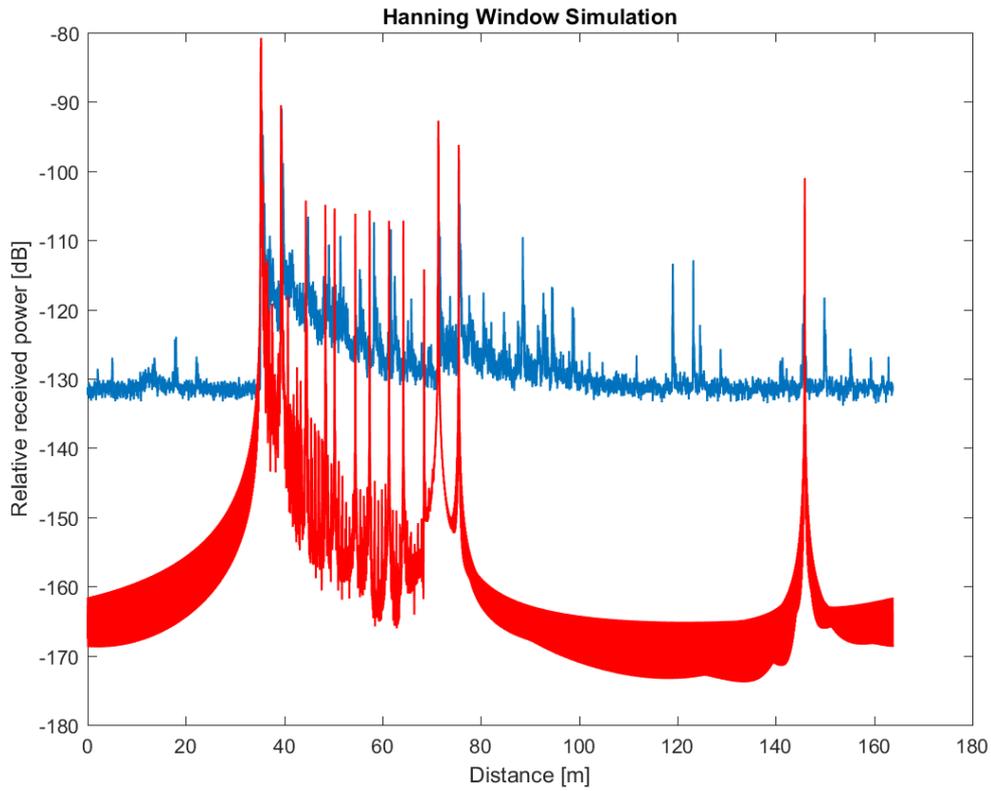


Figura 42. Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario uno, posición cinco (35 m). Completo.

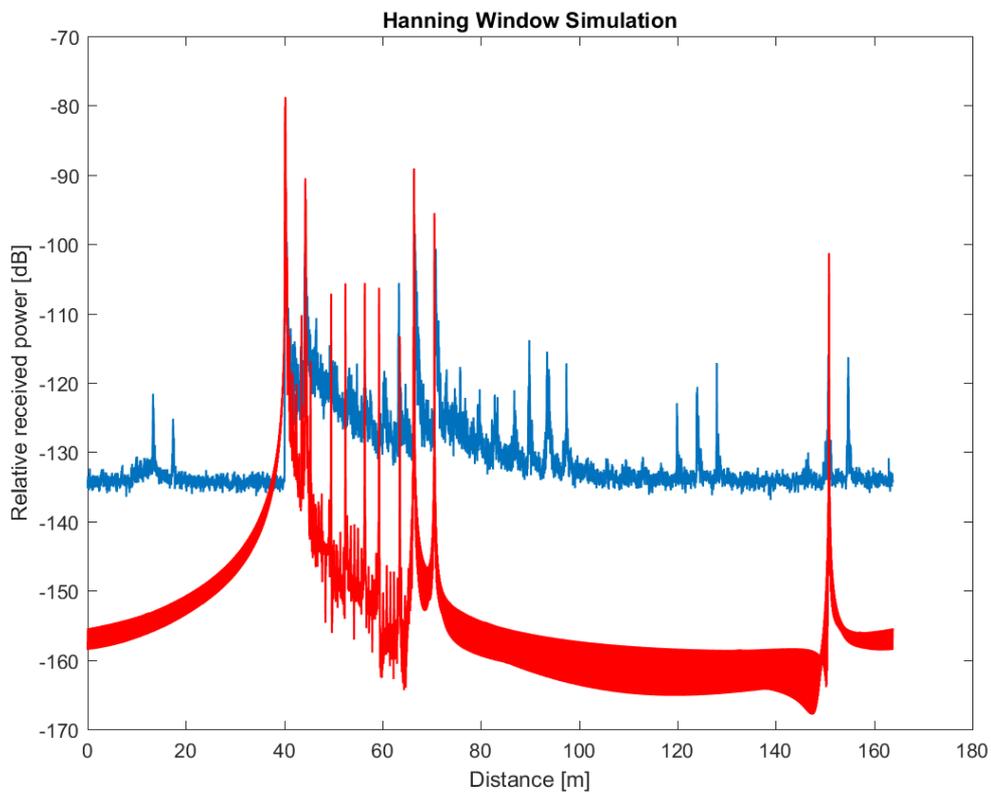


Figura 43. Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario uno, posición seis (40 m). Completo.

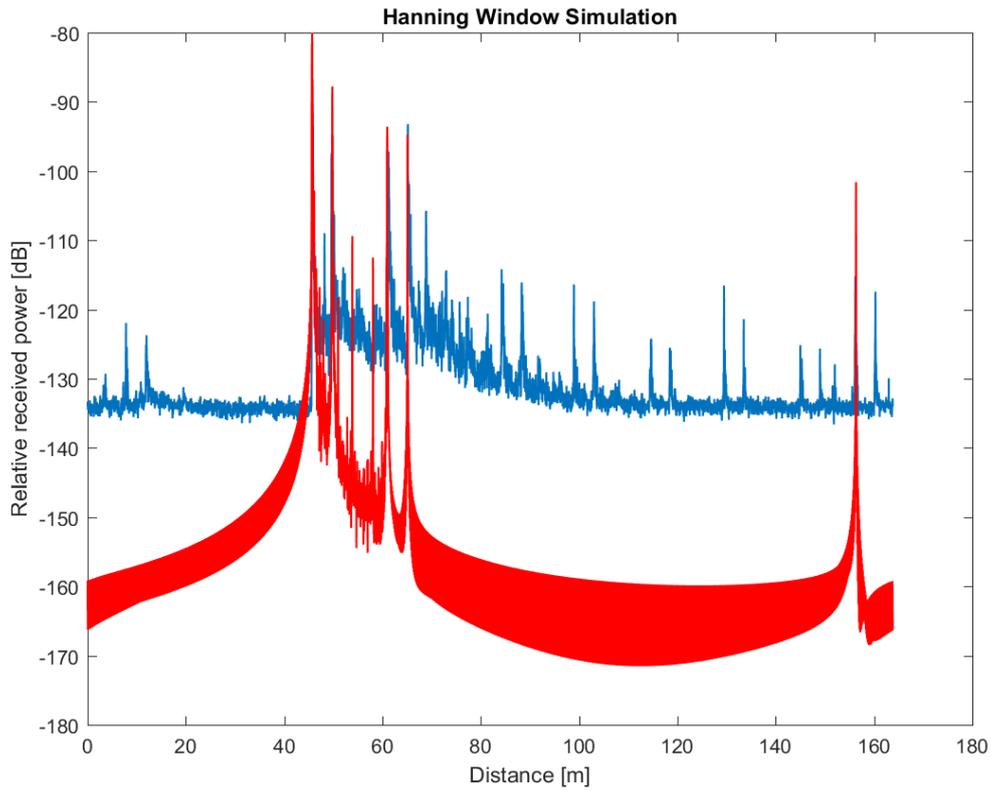


Figura 44. Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario uno, posición siete (45 m). Completo.

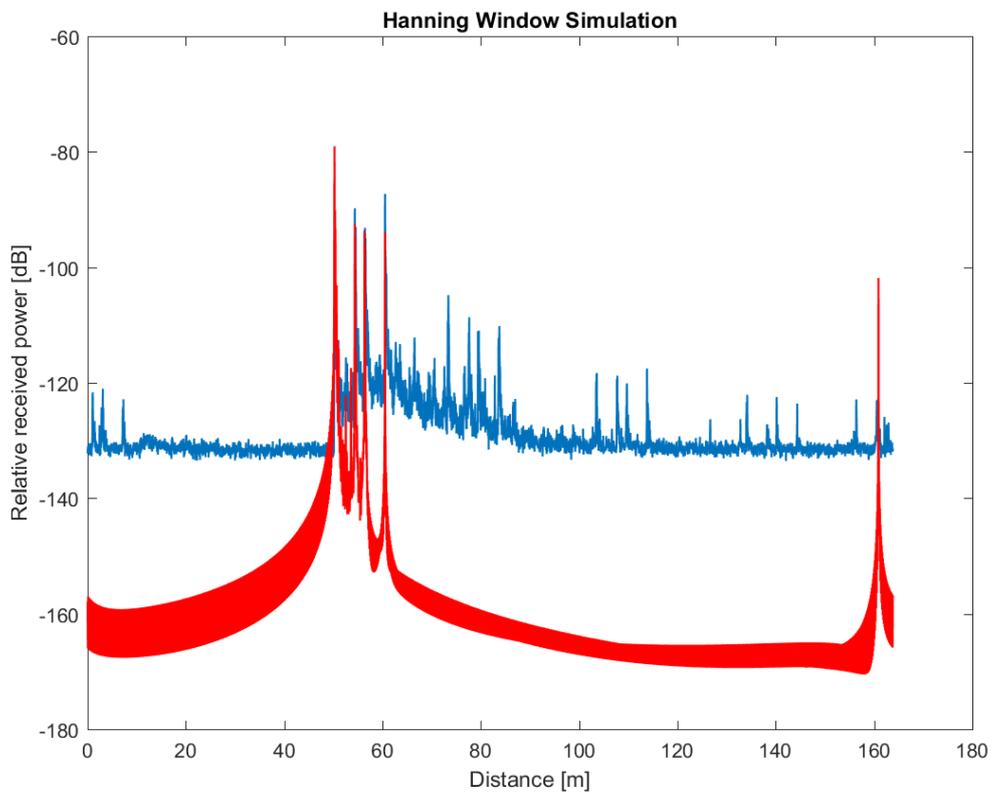


Figura 45. Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario uno, posición ocho (50 m). Completo.

#### 4.2.4.2 Escenario 2

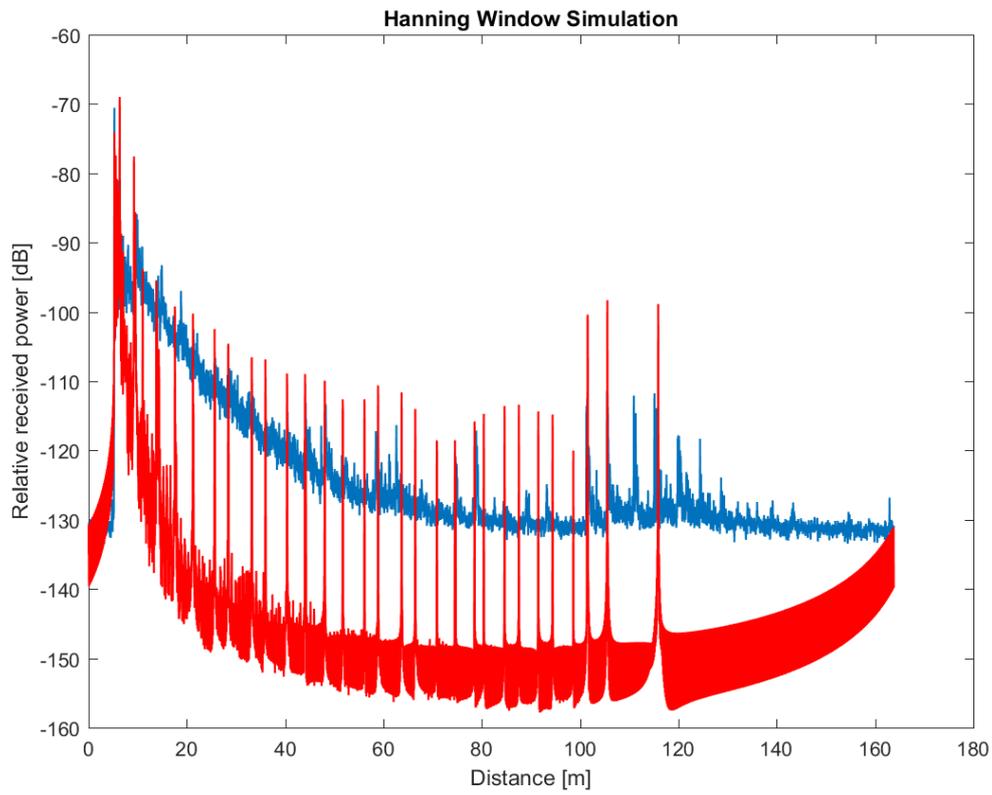


Figura 46. Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario dos, posición uno (5 m). Completo.

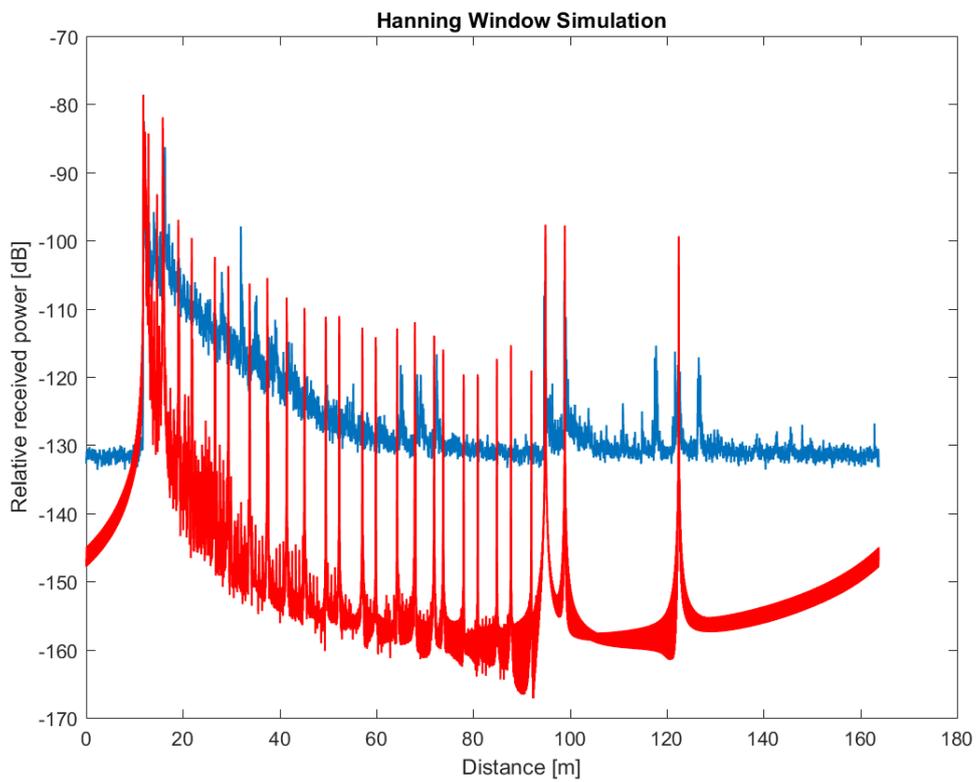


Figura 47. Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario dos, posición dos (12 m). Completo.

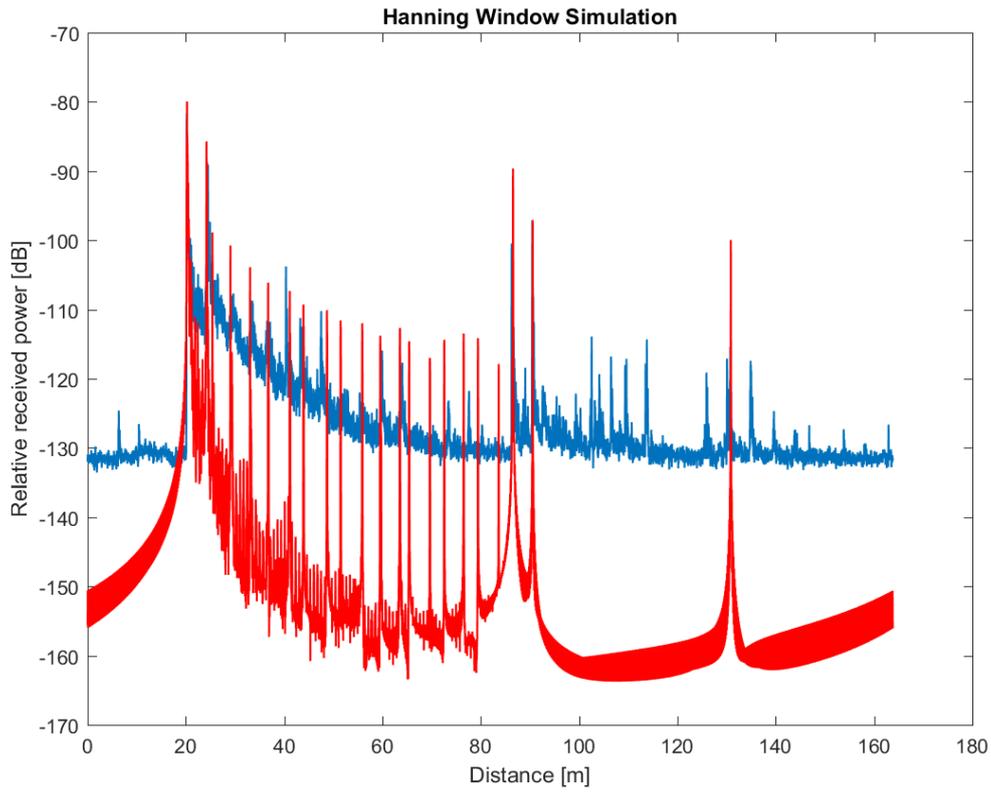


Figura 48. Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario dos, posición tres (20 m). Completo.

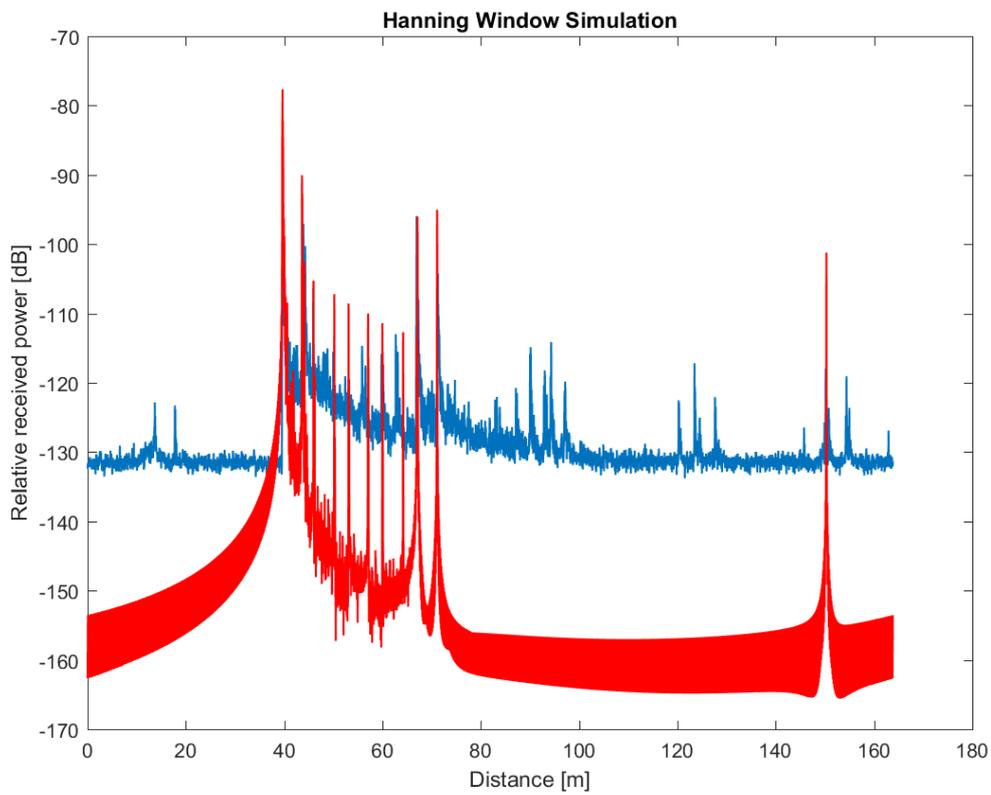


Figura 49. Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario dos, posición cuatro (40 m). Completo.

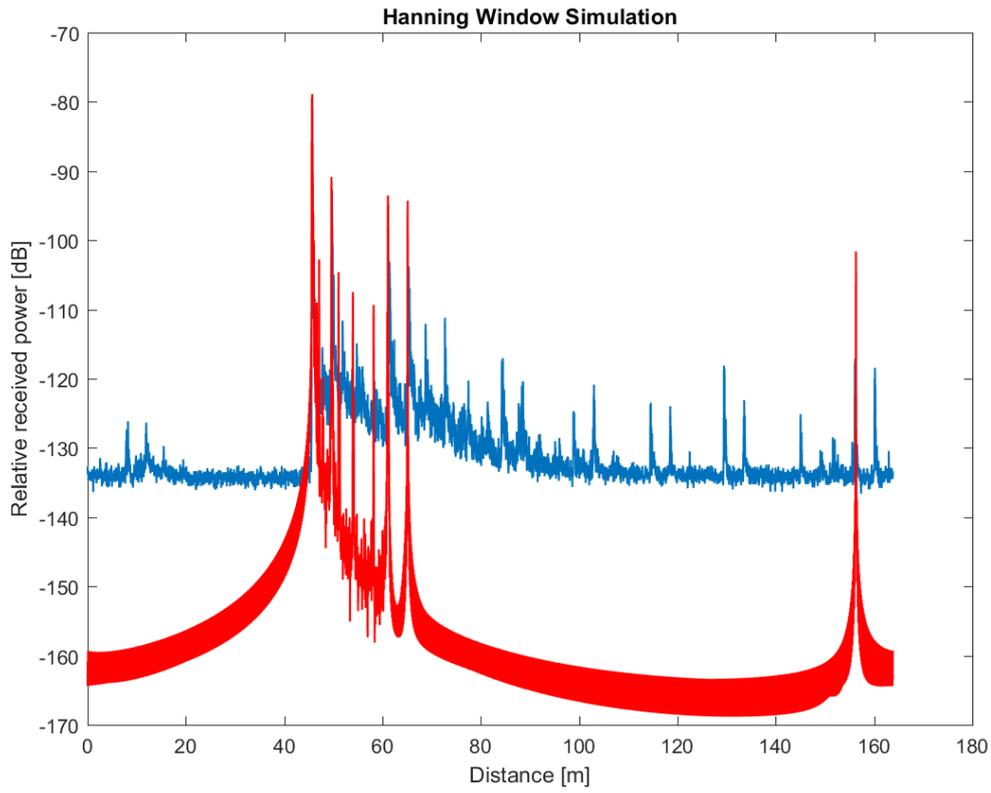


Figura 50. Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario dos, posición cinco (45 m). Completo.

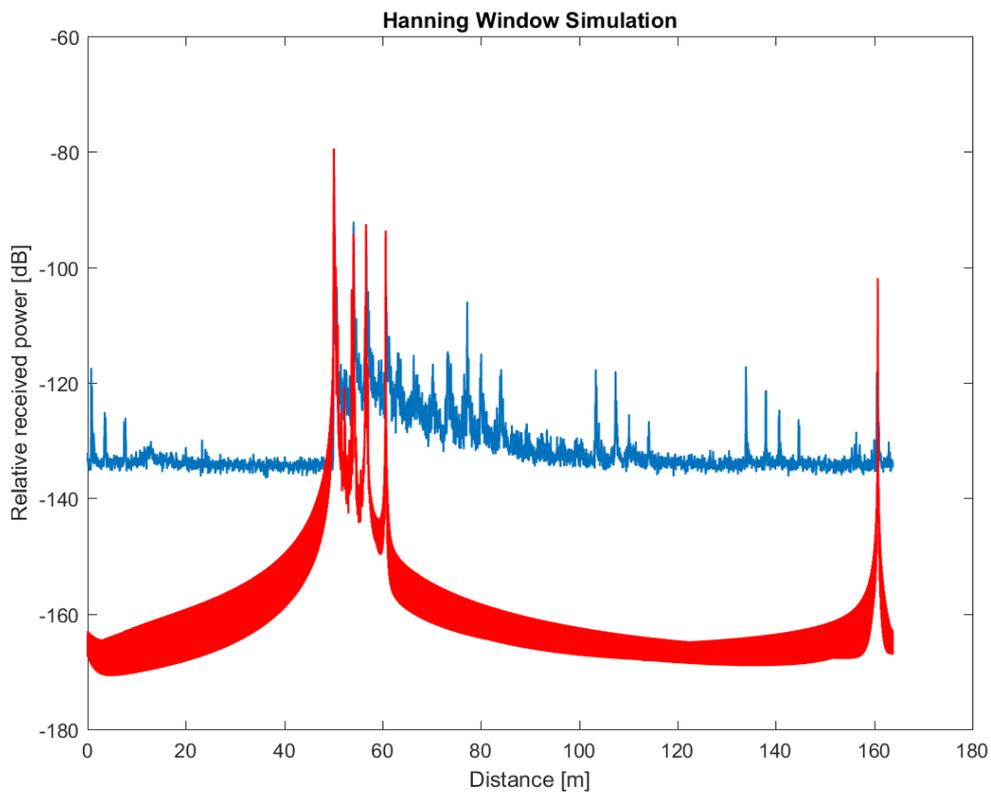


Figura 51. Comparación del PDP medido con el PDP simulado en escenario dos, posición tres (50 m). Completo.

### 4.3 ANÁLISIS CUANTITATIVO

En este apartado se procederá a mostrar los valores buscados de valor medio del retardo, RMS del retardo y *path loss*, explicados en el Capítulo 3, comparándolos además entre sí. El valor de umbral utilizado es de 20 dB.

Para entender las tablas, los valores *Sim* corresponden a los que se han obtenido en las simulaciones, mientras que los *Meas* son los que se han obtenido con el PDP medido en el tren. *RMS* es el valor cuadrático medio del retardo, *VM* es el valor medio del retardo y *PL* es el *path loss*. En los valores de RMS y valor medio se obtiene, como dato objetivo, la precisión *Prec%*, mientras que en el *path loss* se obtiene la diferencia *Dif*, en valor absoluto. Las unidades tanto de los valores de RMS como del valor medio son de nanosegundos (ns o  $10^{-9}$  s), mientras que la unidad del *path loss* es el decibelio (dB).

#### 4.3.1 Simulaciones con una reflexión

En el escenario uno se puede observar, en las Tablas 1 y 2, como el valor medio del retardo tiene una precisión mayor del 90% en todas sus posiciones, igual que en el escenario dos, a excepción de la posición uno. Esto se repite en las demás simulaciones. La razón de que la posición uno es la que menos precisión tiene, si se compara entre las primeras posiciones, es debido a que tiene un exceso de potencia en el rayo directo que las otras posiciones no tienen. Esto se puede apreciar en el Análisis Cualitativo anteriormente detallado.

Pos	RMS Sim	RMS Meas	Prec% RMS	VM Sim	VM Meas	Prec% VM	PL Sim	PL Meas	Dif
1	4,85	6,51	74,44	19,64	23,11	84,97	66,4	65,36	1,04
2	5,06	5,82	86,97	34,38	36,92	93,12	70,34	70,27	0,07
3	5,26	6,07	86,68	50,44	51,7	97,56	73,37	72,37	1
4	6,64	7,7	86,13	72,06	74,98	96,11	78,79	76,4	2,39
5	25,98	36,63	70,91	125,8	135,28	92,99	79,84	78,45	1,39
6	28,84	40,16	71,81	149,8	165,17	90,69	83,26	81,82	1,44
7	19,19	27,71	69,25	166,23	179,68	92,51	84,16	80,83	3,34
8	8,8	13,23	66,55	176,2	187,17	94,14	84,52	78,11	6,41

Tabla 1. Datos de RMS, VM y PL en el escenario uno con una reflexión.

El hecho de que tengan una precisión próxima al 70% o más en este tipo de simulaciones es positiva. Esto es por el hecho de que no se ha simulado todos los mecanismos de propagación del canal y, aun así, se tiene una precisión alta, mostrando que el entorno modelado no va mal encaminado.

Pos	RMS Sim	RMS Meas	Prec% RMS	VM Sim	VM Meas	Prec% VM	PL Sim	PL Meas	Dif
1	4,90	4,38	88,09	20,58	19,51	94,51	67,69	63,94	3,75
2	5,99	5,92	98,82	43,65	42,10	96,31	73,93	70,46	3,47
3	5,93	6,03	98,32	71,08	70,89	99,73	76,98	73,76	3,22
4	29,70	38,21	77,73	148,20	156,62	94,62	83,00	81,46	1,55
5	14,94	14,18	94,67	158,69	159,88	99,25	80,64	80,09	0,56
6	8,49	10,65	79,73	172,59	174,23	99,06	82,25	80,97	1,28

Tabla 2. Datos de RMS, VM y PL en el escenario dos con una reflexión.

### 4.3.2 Simulaciones con dos reflexiones

En estas simulaciones se obtiene una mejoría en el valor medio en comparación con las simulaciones con una reflexión, llegando a valores de 95% o, incluso, 99%. Esto es debido a que las contribuciones que faltaban en esas simulaciones se han añadido en esta. En cuanto a los valores de RMS se aprecia, en la Tabla 3, que, en determinadas posiciones como la tres y cuatro del escenario uno, empeora; esto es debido a que influye en ellas una contribución de alta potencia que no debería estar.

Pos	RMS Sim	RMS Meas	Prec% RMS	VM Sim	VM Meas	Prec% VM	PL Sim	PL Meas	Dif
1	5,16	6,51	79,31	20,05	23,11	86,76	66,15	65,36	0,79
2	5,36	5,82	92,04	36,04	36,92	97,62	67,43	70,27	2,85
3	7,96	6,07	68,85	51,84	51,70	99,73	72,00	72,37	0,38
4	6,39	7,70	82,97	72,25	74,98	96,37	77,08	76,40	0,68
5	39,70	36,63	91,62	134,91	135,28	99,72	79,02	78,45	0,57
6	38,96	40,16	97,01	168,42	165,17	98,03	79,75	81,82	2,07
7	23,86	27,71	86,11	171,79	179,68	95,61	81,85	80,83	1,03
8	11,59	13,23	87,63	180,08	187,17	96,21	82,12	78,11	4,01

Tabla 3. Datos de RMS, VM y PL en el escenario uno con dos reflexiones.

En cuanto al escenario dos, se puede apreciar en la Tabla 4 que la precisión del RMS empeora en comparación con los datos anteriores con una reflexión. El motivo de ello es la aparición de contribuciones con altas potencias que no deberían estar, como se explicó anteriormente. El escenario dos, debido a que no se sitúa el transmisor en el centro del tren, es más propenso a estos fallos y, por eso, disminuye la precisión.

Pos	RMS Sim	RMS Meas	Prec% RMS	VM Sim	VM Meas	Prec% VM	PL Sim	PL Meas	Dif
1	3,62	4,38	82,71	21,27	19,51	90,99	63,44	63,94	0,50
2	6,27	5,92	94,08	46,48	42,10	89,60	70,89	70,46	0,42
3	6,67	6,03	89,52	73,74	70,89	95,97	75,12	73,76	1,36
4	37,31	38,21	97,64	156,37	156,62	99,84	80,57	81,46	0,89
5	19,53	14,18	62,34	162,30	159,88	98,48	78,68	80,09	1,41
6	11,91	10,65	88,26	177,25	174,23	98,27	80,83	80,97	0,14

Tabla 4. Datos de RMS, VM y PL en el escenario dos con dos reflexiones.

### 4.3.3 Simulaciones con dos reflexiones y difracción

En el Análisis Cualitativo se comentó que la difracción podría afectar positiva o negativamente a las simulaciones, y esto se puede comprobar en los datos de las Tablas 5 y 6. Observando el escenario uno, se aprecia que, mientras que en las primeras posiciones se mejora la precisión en el RMS, en las intermedias y últimas ésta empeora sustancialmente llegando a valores por debajo del 50%.

El escenario dos no es ninguna excepción y se puede comprobar que le ocurre exactamente lo mismo. La bajada de precisión no es tan llamativa en las primeras posiciones, mientras que en las intermedias y las últimas sí es bastante llamativa, llegando a un 30% de precisión.

Esto se puede explicar observando cómo la precisión del valor medio no baja tanto como la del RMS. Que el valor medio no se vea tan afectado por la difracción es debido a que el problema radica en el aumento de potencia de las contribuciones que ya están dentro del umbral, como se puede observar en la Figura 34 anteriormente expuesta.

Pos	RMS Sim	RMS Meas	Prec% RMS	VM Sim	VM Meas	Prec% VM	PL Sim	PL Meas	Dif
1	5,07	6,51	77,90	19,95	23,11	86,34	66,01	65,36	0,65
2	5,45	5,82	93,64	36,00	36,92	97,50	67,46	70,27	2,81
3	5,88	6,07	96,84	51,42	51,70	99,47	72,58	72,37	0,21
4	5,05	7,70	65,58	69,53	74,98	92,74	71,40	76,40	5,01
5	22,46	36,63	61,32	122,43	135,28	90,50	72,67	78,45	5,78
6	18,80	40,16	46,83	138,61	165,17	83,92	71,72	81,82	10,10
7	11,60	27,71	41,86	155,80	179,68	86,71	72,94	80,83	7,89
8	6,70	13,23	50,68	169,61	187,17	90,61	74,83	78,11	3,28

Tabla 5. Datos de RMS, VM y PL en el escenario uno con dos reflexiones y difracción.

Pos	RMS Sim	RMS Meas	Prec% RMS	VM Sim	VM Meas	Prec% VM	PL Sim	PL Meas	Dif
1	3,38	4,38	77,08	21,02	19,51	92,27	63,71	63,94	0,24
2	5,47	5,92	92,50	43,16	42,10	97,49	70,47	70,46	0,01
3	5,34	6,03	88,47	70,30	70,89	99,17	72,86	73,76	0,90
4	11,61	38,21	30,40	134,11	156,62	85,63	72,18	81,46	9,28
5	9,25	14,18	65,20	154,20	159,88	96,45	71,64	80,09	8,45
6	6,36	10,65	59,69	168,91	174,23	96,95	73,61	80,97	7,36

Tabla 6. Datos de RMS, VM y PL en el escenario dos con dos reflexiones y difracción.

#### 4.3.4 Simulaciones completas con dos reflexiones, difracción y difusión

La difusión no modifica tanto los valores obtenidos respecto a los anteriores mostrado con dos reflexiones y difusión, llegando a ser prácticamente iguales en algunas posiciones como la ocho del escenario uno y la cinco del escenario dos. Esto es debido a que el efecto de difusión, en nuestro caso, solo supone un pequeño aumento de potencia a lo largo de todas las contribuciones, no influyendo tanto en la precisión de la simulación

Pos	RMS Sim	RMS Meas	Prec% RMS	VM Sim	VM Meas	Prec% VM	PL Sim	PL Meas	Dif
1	5,23	6,51	80,30	20,19	23,11	87,38	65,65	65,36	0,29
2	5,40	5,82	92,70	35,89	36,92	97,23	67,34	70,27	2,94
3	5,93	6,07	97,69	51,52	51,70	99,66	72,45	72,37	0,07
4	5,05	7,70	65,50	69,52	74,98	92,72	71,39	76,40	5,01
5	22,82	36,63	62,29	122,59	135,28	90,62	72,64	78,45	5,80
6	18,93	40,16	47,15	138,71	165,17	83,98	71,71	81,82	10,11
7	11,81	27,71	42,63	156,00	179,68	86,82	72,91	80,83	7,92
8	6,68	13,23	50,45	169,63	187,17	90,63	74,80	78,11	3,31

Tabla 7. Datos de RMS, VM y PL en el escenario uno con dos reflexiones, difracción y difusión.

Pos	RMS Sim	RMS Meas	Prec% RMS	VM Sim	VM Meas	Prec% VM	PL Sim	PL Meas	Dif
1	3,34	4,38	76,29	21,01	19,51	92,30	63,59	63,94	0,36
2	5,47	5,92	92,44	43,17	42,10	97,46	70,23	70,46	0,23
3	5,41	6,03	89,60	70,39	70,89	99,30	72,89	73,76	0,87
4	11,61	38,21	30,39	134,18	156,62	85,67	72,13	81,46	9,33
5	9,27	14,18	65,36	154,23	159,88	96,46	71,66	80,09	8,43
6	6,37	10,65	59,78	168,92	174,23	96,95	73,61	80,97	7,36

Tabla 8. Datos de RMS, VM y PL en el escenario dos con dos reflexiones, difracción y difusión.

# CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

## 5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

---

A pesar de que el entorno modelado en 3D tenga muchas imperfecciones y que las simulaciones no son con todos los mecanismos de propagación posibles en el tren, los resultados de las simulaciones han sido positivas. Con este entorno, en los escenarios uno y dos, se ha llegado a obtener, por norma general, una precisión mayor al 80% cuando no tenemos en cuenta la difracción.

Sin embargo, hay muchas cosas por mejorar tanto en el entorno modelado en 3D como en el trazador de rayos. En cuanto a este último, se ha obviado a lo largo de todo el proyecto las modificaciones que se tuvieron que realizar, tales como la optimización de la simulación y las modificaciones de los ángulos. Además, habría que observar con más detenimiento cómo funciona en el trazador la difracción y la difusión, ya que son los dos mecanismos de propagación que más se alejan de la realidad en los resultados expuestos.

Respecto al entorno, habría que tener en cuenta algunos elementos como son los revestimientos y algunos plásticos situados cerca de las puertas, además de la posibilidad de que algunos rayos atravesen el techo de la zona habitable y choquen con el verdadero techo del tren; estos elementos podrían ayudar a precisar más las simulaciones y solucionar, en parte, el problema de precisión que trae la difracción.

Sin embargo, el problema que acarrea estas mejoras es que se obtiene un mayor tiempo de simulación. Es decir, a la hora de simular estos entornos más cercanos a la realidad, el tiempo total necesario para obtener los resultados es mayor. Se recuerda que, en estas simulaciones, no se tienen en cuenta ni los plásticos situados a los lados de las puertas ni las propias sillas debido a esto. El tiempo máximo de simulación de una posición que se ha obtenido ha sido de unas diez horas en las condiciones expuestas en el proyecto. Añadir más elementos aumentaría ese tiempo de simulación sustancialmente, sobre todo en las simulaciones con difracción y difusión.

Por ello, para lograr mejores valores de simulación en un futuro, se debería encontrar el equilibrio entre tiempo de simulación y número de elementos. Para ello, las ideas expuestas son la simplificación de los elementos y el aumento de exactitud en el entorno.

La simplificación de los elementos del entorno consistiría en reducir algunos elementos que no influyen tanto en las simulaciones fusionándolos en uno solo. Esto es lo que se podría hacer con las barandillas horizontales situadas a ambos lados del vagón cerca del techo o, directamente, con las sillas. En vez de hacer las barandillas y las sillas una a una, se harían todas juntas para reducir el número de elementos en el entorno de simulación. En vez de tener treinta y seis elementos en un grupo de tres sillas, se tendría solo seis realizando esto, por lo que no aumentaría en gran medida el tiempo de simulación.

El aumento de exactitud en el entorno consistiría en saber al 100% cómo es el entorno que modelar. Esta idea es debida al hecho de que la pared frontal y la pared del fondo del tren, además de algunas paredes de los propios vagones, son muy importantes en las simulaciones y no se tiene información a penas sobre ellas. En el plano proporcionado aparece el grosor de las paredes laterales, el del techo y el del suelo, pero no el de estas paredes. Por ello, en el entorno modelado habría que modificar los revestimientos laterales para hacerlos fieles a la realidad, añadir el segundo techo con su grosor y mejorar la pared frontal y la del fondo del tren.

## CAPÍTULO 6: BIBLIOGRAFÍA

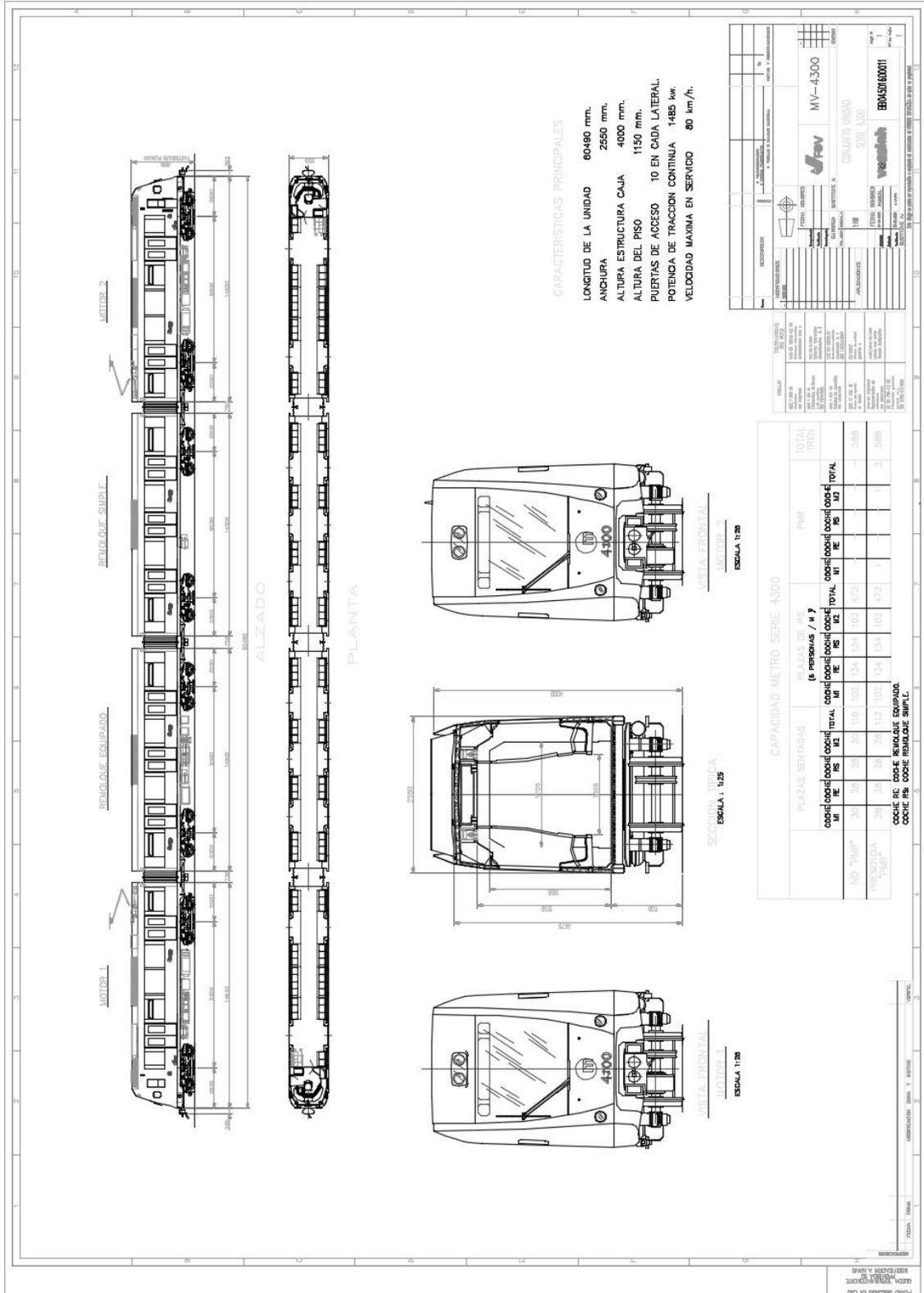
## 6 BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] Universidad Internacional de Valencia. (12 de octubre de 2016). *Evolución de la red de comunicación móvil, del 1G al 5G*. Obtenido de <https://www.universidadviu.es/evolucion-la-red-comunicacion-movil-del-1g-al-5g/>
- [2] Pascual, J., Molina, J. M., & Llácer, L. J. (2012). *Sistemas de Comunicaciones Móviles - Segunda, Tercera y Cuarta Generación*. Universidad Politécnica de Cartagena.
- [3] Qualcomm. (s.f.). *5G FAQ*. Obtenido de <https://www.qualcomm.com/invention/5g/what-is-5g>
- [4] Nordrum, A. (27 de enero de 2017). *Everything you need to know about 5G*. Obtenido de IEEE Spectrum Web Site: <https://spectrum.ieee.org/video/telecom/wireless/everything-you-need-to-know-about-5g>
- [5] Pascual, J., Molina, J. M., & Llácer, L. J. (2010). *Sistemas de Comunicaciones Móviles - Caracterización del Canal Móvil*. Universidad Politécnica de Cartagena.
- [6] Estudio de Música Electroacústica. (s.f.). *Introducción a la Teoría del Procesamiento Digital de Señales de Audio*. Obtenido de <https://www.eumus.edu.uy/eme/ensenanza/electivas/dsp/presentaciones/clase06.pdf>
- [7] López, V. (7 de diciembre de 2010). *Conceptos básicos sobre ondas*. Obtenido de Varinia: <http://varinia.es/blog/2010/12/07/conceptos-basicos-sobre-ondas/>
- [8] ConceptoYDefinicion.com. (s.f.). *Definición de difracción*. Obtenido de <https://conceptoydefinicion.com/difraccion/>
- [9] Wikipedia – La enciclopedia libre. (s.f.) *Reflexión difusa*. Obtenido de [https://es.wikipedia.org/wiki/Reflexi%C3%B3n\\_difusa](https://es.wikipedia.org/wiki/Reflexi%C3%B3n_difusa)
- [10] Wikipedia - La enciclopedia libre. (s.f.). *AutoCAD*. Obtenido de <https://es.wikipedia.org/wiki/AutoCAD>
- [11] Wikipedia - La enciclopedia libre. (s.f.). *MATLAB*. Obtenido de <https://es.wikipedia.org/wiki/MATLAB>
- [12] International Telecommunication Union. (julio de 2015). *Effectos of building materials and structures on radiowave propagation above about 100 MHz*.
- [13] Vázquez, A., García, M. & Cuiñas, I. (6 de noviembre de 2008). *Measurement and analysis of propagation mechanisms at 40 GHz: Viability of site shielding forced by obstacles*.
- [14] UL Prospector. (s.f.) *Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) Propiedades típicas Generic ABS*. Obtenido de <https://plastics.ulprospector.com/es/generics/1/c/t/acrilonitrilo-butadieno-estireno-abs-properties-processing>
- [15] Inglehart, J.A (13 de marzo de 2018). *Aluminium Vs. Steel Conductivity*. Obtenido de Sciencing: <https://sciencing.com/aluminum-vs-steel-conductivity-5997828.html>

# 7 ANEXOS

## 7.1 ANEXO UNO – PLANO DEL TREN DE METRO



## 7.2 ANEXO DOS – PROPIEDADES DE LOS MATERIALES UTILIZADOS

```
##### 1 = cristal #####
er_cristal=6.27-0.1853i;
conductivity_cristal=1E-14;
aten_cristal=(10*2.5/4)*100; %2.5dB para 4mm de grosor.
perf_cond_cristal=0;
#####

##### 2 = plastico ABS #####
er_plasticoABS=3.1;
conductivity_plasticoABS=1E-15;
aten_plasticoABS=11*100; %11dB para 1cm de grosor.
perf_cond_plasticoABS=0;
#####

##### 3 = aluminio #####
er_aluminio=1;
conductivity_aluminio=3.8E7;
aten_aluminio=1.636e10;
perf_cond_aluminio=1;
#####
```

La propiedad relativa del cristal y su conductividad se han sacado mediante la fórmula universal que proporciona la ITU. [12] Su atenuación se ha sacado del artículo *Measurement and Analysis of Propagation Mechanisms at 40 GHz: Viability of Site Shielding Forced by Obstacles* de Ana Vázquez, Manuel García e Íñigo Cuiñas. [13]

Las propiedades del ABS se han sacado de la página web Prospector. [14]

La conductividad del aluminio se ha sacado de la página web de Sciencing. [15]