



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

– **TELECOM** ESCUELA
TÉCNICA **VLC** SUPERIOR
DE INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de
Telecomunicación

Caracterización de canales radio en bandas de frecuencias
milimétricas para la evolución de 5G

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de
Telecomunicación

AUTOR/A: Cánovas Cuadrado, Jose

Tutor/a: Cardona Marcet, Narciso

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

Resumen

En este Trabajo Final de Grado se ha analizado el comportamiento de la propagación de las señales de RF en las bandas milimétricas en las que trabaja la tecnología 5G. Para su análisis se ha llevado a cabo una comparación entre medidas realizadas con un analizador de redes en un entorno real y simulaciones realizadas con un simulador de trazado de rayos, ambas en entornos interiores. Se ha comprobado si para bandas milimétricas solo es necesario tener en cuenta la visión directa y una o dos reflexiones despreciándose fenómenos como múltiples reflexiones, transmisiones y difracciones.

El simulador nos ha ayudado a saber de dónde proceden las contribuciones que obtenemos en el Power Delay Profile del analizador de redes y determinar los fenómenos de propagación más relevantes en estos escenarios.

Estos resultados serán útiles para la planificación y gestión de futuras redes basadas en 5G o en su evolución, así como para sistemas inalámbricos de banda ancha que operen en estas frecuencias.

Resum

En aquest Treball Final de Grau s'ha analitzat el comportament de la propagació dels senyals de RF en les bandes mil·limètriques en les quals treballa la tecnologia 5G. Per a la seua anàlisi s'ha dut a terme una comparació entre mesures realitzades amb un analitzador de xarxes en un entorn real i simulacions realitzades amb un simulador de traçat de raigs, totes dues en entorns interiors. S'ha comprovat si per a bandes mil·limètriques només és necessari tindre en compte la visió directa i una o dues reflexions menyspreant-se fenòmens com a múltiples reflexions, transmissions i difraccions.

El simulador ens ha ajudat a saber d'on procedeixen les contribucions que obtenim en el Power Delay Profile de l'analitzador de xarxes i determinar els fenòmens de propagació més rellevants en aquests escenaris.

Aquests resultats seran útils per a la planificació i gestió de futures xarxes basades en 5G o en la seua evolució, així com per a sistemes sense fils de banda ampla que operen en aquestes freqüències.

Abstract

In this Final Degree Project, the behavior of the propagation of RF signals in the millimeter wave bands in which 5G technology works has been analyzed. For its analysis, a comparison has been made between measurements made with a network analyzer in a real environment and simulations made with a ray tracing simulator, both in indoor environments. It has been verified whether for millimeter wave bands it is only necessary to take into account direct vision and one or two reflections, neglecting phenomena such as multiple reflections, transmissions and diffractions.

The simulator has helped us to know where the contributions that we obtain in the Power Delay Profile of the network analyzer come from and to determine the most relevant propagation phenomena in these scenarios.

These results will be useful for the planning and management of future networks based on 5G or its evolution, as well as for broadband Wireless systems that operate at these frequencies.



Índice

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivos	1
1.3 Propagación multicamino.....	1
Capítulo 2. MEDIDAS REALES.....	3
2.1 Analizador de redes vectorial.....	3
2.2 Entorno de trabajo	5
2.3 Parámetros.....	6
2.4 Medidas	6
Capítulo 3. SIMULADOR	8
3.1 Simulador 3D	8
3.2 Proceso de simulación.....	10
3.3 Fichero extraído.....	10
3.4 Simulación del fenómeno de transmisión	11
3.5 Simulación en el interior de la sala	13
Capítulo 4. COMPARATIVA DE MEDIDAS Y SIMULACIÓN	20
4.1 Comparativa	20
Capítulo 5. CONCLUSIONES	26
BIBLIOGRAFÍA.....	27
ANEXO 1. CÓDIGO MATLAB PARA COMPARACIÓN DE MEDIDAS.....	28
ANEXO 2. PDP DEL RESTO DE POSICIONES.....	31

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

La implantación del 5G llega para aumentar la velocidad de conexión, reducir al mínimo la latencia y aumentar exponencialmente el número de dispositivos conectados. Esta quinta generación sustituye a la anterior tecnología 4G/LTE que estaba quedando oxidada con las nuevas exigencias de los usuarios.

Esta tecnología transmite una gran cantidad de datos a distancias más cortas que su predecesor, esto puede llegar a ser un inconveniente por el aumento del número de antenas que es necesario para satisfacer la demanda.

El estándar 5G se ha especificado para funcionar en diversas bandas de frecuencia, desde UHF hasta bandas milimétricas y a diferencia de generaciones anteriores se utilizan frecuencias por encima de los 6 GHz. Esto abre un gran abanico de cuestiones sobre el canal móvil, si realmente va a funcionar igual que en las generaciones anteriores al utilizar estas frecuencias tan altas, si se conseguirá tener cobertura y alcance suficiente desde un nodo de acceso radio.

Para las bandas milimétricas la señal de radiofrecuencia se atenúa más rápidamente con el aumento de la distancia, los objetos reflejan con mayor intensidad las ondas electromagnéticas, se propagan peor a través de obstáculos y por lo tanto los efectos de propagación dominante son la propagación en espacio libre cuando hay visión directa y las reflexiones. Actualmente muchos autores defienden que en esta banda de frecuencias no es necesario considerar otros fenómenos de propagación que no sean las reflexiones, y que la propagación cuando la señal se refleja en una o dos superficies ya pierde suficiente energía como para que nos sea significativa, pero eso no es completamente cierto tal como vamos a ver en el desarrollo de este proyecto.

1.2 Objetivos

El objeto de este trabajo es analizar el comportamiento de la propagación de las señales de RF en las bandas milimétricas en las que trabaja esta tecnología. Para ello se va a llevar a cabo una comparación entre medidas que han sido realizadas en un entorno real y simulaciones realizadas con un simulador de trazado de rayos, ambas en entornos interiores.

Estos resultados nos serán útiles para la planificación y gestión de futuras redes basadas en 5G o en su evolución, así como para sistemas inalámbricos de banda ancha que operen en estas frecuencias.

1.3 Propagación multicamino

Uno de los principales aspectos a tener en cuenta para definir el canal es la propagación multicamino, pues la presencia de objetos reflectantes lleva a que las señales lleguen al receptor por diferentes trayectorias y distintos mecanismos de propagación como, transmisiones, reflexiones y difracciones [1]. Esto lleva a que las señales recibidas tengan diferentes retardos de tiempo, atenuaciones y fases, dando lugar a un canal muy complejo.

El Power Delay Profile (PDP), es la representación de la potencia recibida en el receptor en función del tiempo [2]. La fórmula que lo define es la siguiente:

$$P(\tau) = \overline{|h(t, \tau)|^2}. \quad (1.1)$$

Donde $h(t, \tau)$ es la función de la respuesta al impulso en el dominio del tiempo, esta función es variable en el tiempo, puesto que el canal radio también puede cambiar en el tiempo. Se define como:

$$h(t, \tau) = \sum_{i=0}^{N-1} a_i(t) \delta(\tau - \tau_i(t)) \exp[j2\pi f_c \tau_i(t) + \phi_i(t, \tau)] \quad (1.2)$$

El perfil de retardo de potencia (PDP) nos permitirá conocer las diferentes réplicas que llegan al receptor y saber el instante de tiempo en el que llegan.

En un sistema de banda ancha, siendo el ancho de banda de la señal transmitida mayor que el ancho de banda de coherencia, podemos definir las pérdidas de trayectoria en función de la respuesta al impulso del canal:

$$P_L = \frac{1}{\int_{\tau} |h(t, \tau)|^2 d\tau} \quad (1.3)$$

Expresado en unidades logarítmicas:

$$PL (dB) = -10 \log(\int_{\tau} |h(t, \tau)|^2 d\tau) \quad (1.4)$$

La potencia de la señal disminuye logarítmicamente con la distancia, tanto para canales radio interiores como exteriores. El promedio de pérdidas de trayectoria para una distancia entre transmisor y receptor, d , es expresada en función de la distancia utilizando un exponente de pérdidas n , tal que:

$$PL (dB) = PL (d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (1.5)$$

Donde n es el exponente de pérdidas de trayectoria y aumenta con la distancia. $PL (d_0)$ es la pérdida de trayectoria a una distancia de referencia (1m normalmente).

Con la información que extraemos de las medidas y la simulación el parámetro que vamos a utilizar en este proyecto es el Power Delay Profile.

Capítulo 2. MEDIDAS REALES

2.1 Analizador de redes vectorial

Para la realización de las medidas reales del canal radio se ha utilizado un analizador de redes vectorial VNA (Vector Network Analyzer), en nuestro caso el modelo R&S ZNB 40 [3], en la Figura 1 podemos ver el aspecto de este en el entorno de trabajo. Este tipo de analizador debido a sus características es comúnmente utilizado para la realización de medidas en interior ya que transmisor y receptor deben estar conectados a este mediante cable y su calibración es muy sensible. Los VNAs originalmente están pensados para analizar las propiedades asociadas con la reflexión y la transmisión de las señales eléctricas de dispositivos, conocidas como parámetros de dispersión (Parámetros-S). Este tipo de analizadores de redes se suelen usar para altas frecuencias, superiores a 1 GHz [4].

Un analizador de red vectorial controla un barrido de frecuencia sintetizado y un equipo de prueba de parámetros S se utiliza para monitorizar la respuesta de frecuencia del canal. El barrido escanea una determinada banda de frecuencias (centrada en la portadora) pasando por frecuencias discretas. El número y el espacio de estos pasos de frecuencia afecta a la resolución temporal de la medición de la respuesta al impulso. Para cada paso de frecuencia, el equipo de prueba de parámetros S transmite una amplitud y fase en el puerto 1, y monitoriza la señal recibida en el puerto 2. Esto permite que el analizador determine la respuesta compleja (parámetro S_{21}) sobre el rango de frecuencia medio. La respuesta es entonces convertida al dominio del tiempo utilizando la Transformada Inversa de Fourier Discreta (IDFT por sus siglas en inglés), dando una versión de banda limitada de la respuesta al impulso. Este sistema puede ser erróneo para canales variables en el tiempo, ya que la respuesta del canal puede cambiar rápidamente, dando una respuesta al impulso incorrecta, pero en nuestro caso el canal no modificará sus características en el tiempo, por lo que evitaremos este problema. En la Figura 2 podemos ver un esquema del VNA.

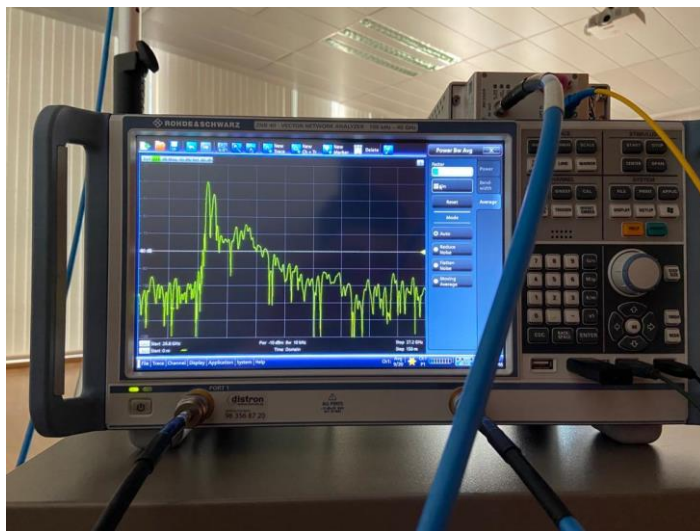


Figura 1. Analizador de Redes Vectorial (VNA)

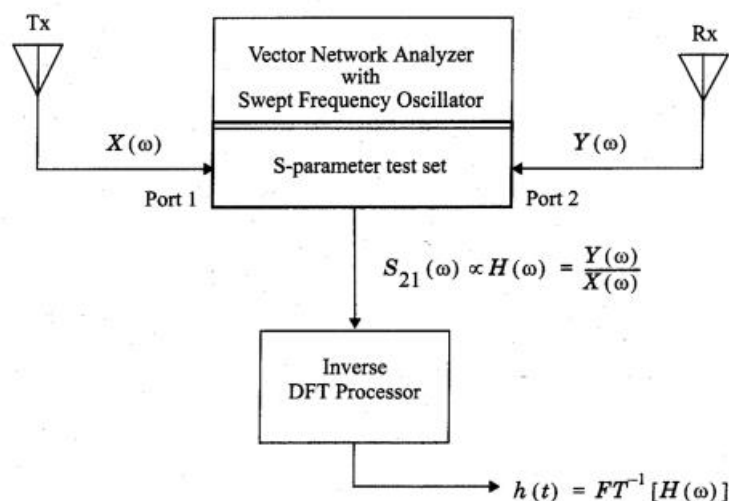


Figura 2. Esquema de medición del canal radio mediante VNAs [4]

Para llevar a cabo estas medidas se han utilizado una antena transmisora y una antena receptora, para la antena transmisora se han utilizado dos tipos de antenas, omnidireccional y de tipo bocina, y la antena receptora siempre omnidireccional. Para la antena transmisora hemos utilizado tres alturas diferentes, 1'60, 1'80 y 2'00 m, y la antena receptora ha sido situada en diferentes posiciones del habitáculo a una altura de 1'00 m. Primero se fijaba la altura de la transmisora y posteriormente se iba tomando medidas en cada una de las posiciones de la receptora.

En la Figura 3 podemos ver la antena transmisora de tipo omnidireccional que ha sido utilizada para la realización de medidas, el analizador de redes y encima de este podemos ver el equipo conversor de radio a fibra óptica que usamos debido a que los cables de RF atenúan muy rápido la señal.



Figura 3. Antena transmisora omnidireccional

Para poder hacer una comparativa entre la antena omnidireccional y la bocina se realizaron medidas en las mismas posiciones y con las mismas alturas, Figura 4.



Figura 4. Antena transmisora bocina

2.2 Entorno de trabajo

Para la realización de las medidas se ha elegido una de las salas del Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (ITEAM) de la UPV, concretamente en el edificio 8G. Las posiciones de estas dos antenas las podemos encontrar en la Figura 5, donde cada uno de los receptores (Rx N) es una de las posiciones donde se ha situado la antena receptora, tomando medidas de cada una de ellas y el punto Tx es la posición de la antena transmisora. También muestro la distancia en cm que separa la posición de cada uno de ellos.

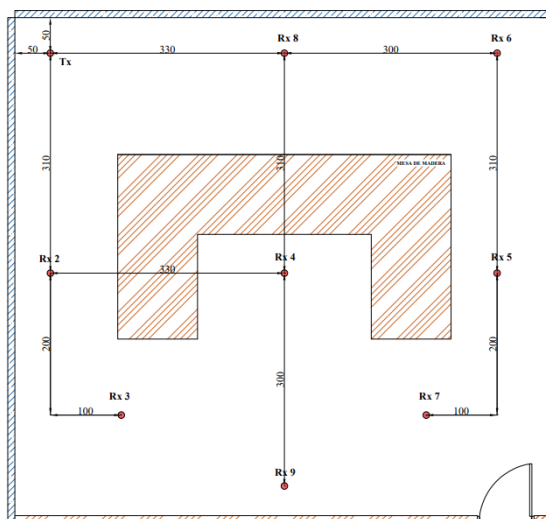


Figura 5. Plano de los elementos de la sala y puntos de medición

Como podemos ver la sala contiene dos materiales distintos, cristal (color azul) para las paredes que dan al exterior y madera (color marrón) para las paredes que dan al interior del edificio, en el centro de la sala se han colocado unas mesas de madera para comprobar si podemos obtener fenómenos como distintas reflexiones, difracciones y transmisiones. Todos estos elementos han

de ser cuidadosamente creados en el simulador 3D para poder tener simulaciones lo más ajustadas a la realidad.

2.3 Parámetros

Los parámetros utilizados para la configuración del analizador de redes al realizar las medidas del canal radio los podemos ver en la Tabla 1.

Frecuencia central	27 GHz
Frecuencia inferior	26,8 GHz
Frecuencia superior	27,2 GHz
Ancho de banda	400 MHz
Número de puntos	8000
Altura transmisora (m)	1'60, 1'80, 2'00
Altura receptora (m)	1'00

Tabla 1. Parámetros de las medidas

2.4 Medidas

Para finalizar este capítulo mostraré y compararé algunas de las medidas realizadas en la sala con el analizador de redes a la frecuencia de 27 GHz, con un ancho de banda de 400 MHz, altura de la antena transmisora de 1'60 m y una altura de la antena receptora de 1 m.

La Figura 6 muestra el Power Delay Profile que se obtiene en la posición 3 con una antena transmisora omnidireccional, lo primero que salta a la vista es que la señal comienza atenuada y rápidamente consigue su mayor valor, pero esto no debería suceder ya que evidentemente las primeras contribuciones en llegar deberían ser las de línea de visión directa, puesto que recorren el camino más corto posible al no rebotar en ningún objeto, esto se debe a que las medidas son una versión suavizada del canal por tener un ancho de banda limitado a 400 MHz y por tanto la resolución temporal no es infinita y encontramos esta especie de “sincs” por la combinación de los rayos que aparecen dentro de estos enventanados de 2'5 ns (inverso del ancho de banda). Si tuviéramos un ancho de banda infinito lo que encontraríamos serían deltas en cada uno de los tiempos de llegada de los rayos, y por eso al principio encontramos las colas que producen las “sincs” que dibujan la PDP, por lo que ese primer pico en torno a los -62 dB sería la primera contribución que llega al receptor, la visión directa, y todo lo anterior son esas colas que deja.

Podemos observar los picos de las contribuciones que van llegando a lo largo del tiempo e intuir que esos primeros serán reflexiones en la pared que hay detrás del receptor o suelo y posteriormente encontramos picos que se deben a múltiples reflexiones.

Vemos que el nivel de señal a partir de los 75 ns ya se atenúa demasiado debido a que los rayos que llegan recorren distancias muy grandes para esta frecuencia y se pierde mucha potencia por el gran número de reflexiones.

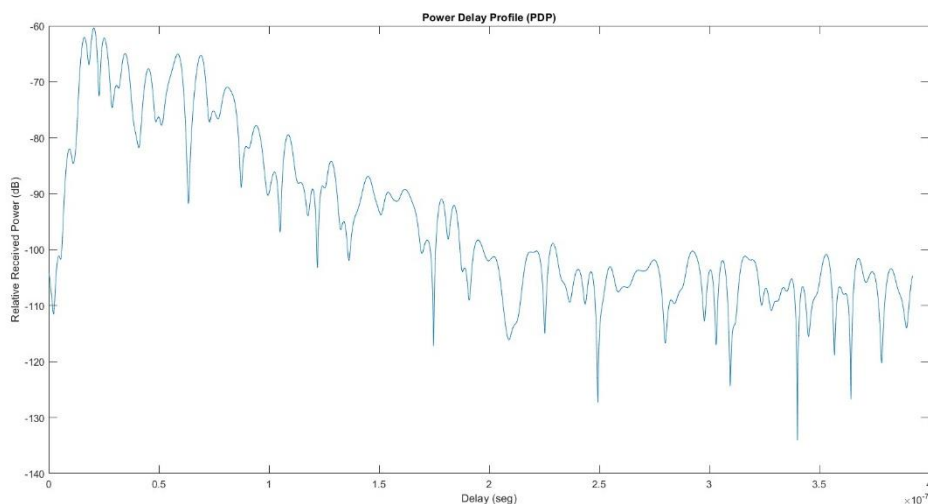


Figura 6. Medida VNA posición 3 con TX a 1'60 m y RX a 1 m

Si comparamos el Power Delay Profile obtenido con la antena omnidireccional con el obtenido usando una antena de tipo bocina, Figura 7, vemos como la bocina tiene un nivel de potencia muy superior en la primera contribución, línea de visión directa, puesto que este tipo de antena es mucho más directiva, en torno a los 50 ns observamos el caso contrario, la antena omnidireccional contiene niveles de potencia elevados y en la bocina se desvanece debido a que los rayos saldrían en una dirección que el diagrama de radiación de la bocina los cancela o atenúa.

Por tanto, comprobamos que en la bocina tenemos mayor nivel de potencia en la visión directa y mayor concentración de nivel en picos para determinados instantes de tiempo porque está enfocando solo a determinadas direcciones. Por lo tanto, en las posiciones que se encuentren dentro del diagrama de radiación de la bocina y de la omnidireccional tendremos mayor ganancia para la bocina, pero a la antena omnidireccional nos llegarán picos de contribuciones procedentes de un mayor número de direcciones.

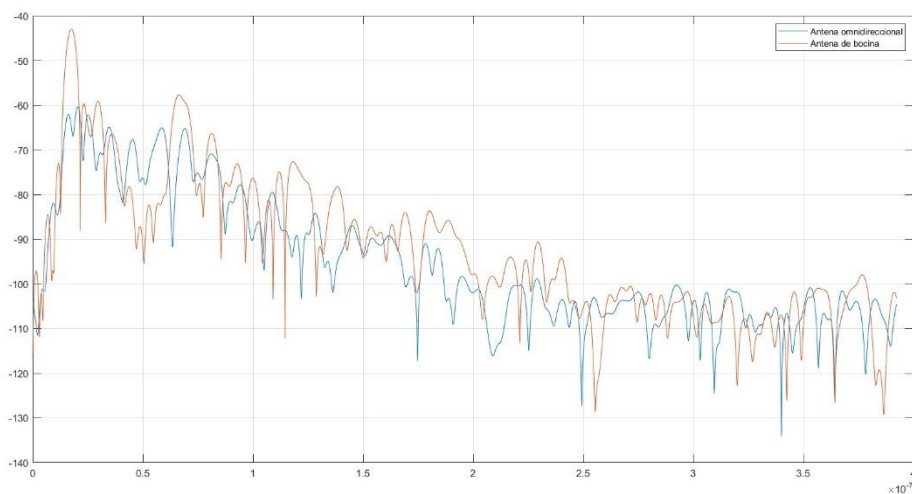


Figura 7. PDP omnidireccional y bocina para posición 3

Capítulo 3. SIMULADOR

3.1 Simulador 3D

En este proyecto vamos a utilizar una herramienta de simulación que ha sido desarrollada por el grupo de investigación de ITEAM, la cual utiliza el motor de juegos Unreal Editor, este ejecuta algoritmos de trazado de rayos para calcular la respuesta impulsional del canal móvil en bandas de frecuencia milimétricas.

En este capítulo voy a explicar el proceso que hay que llevar a cabo para extraer los datos del simulador.

En la Figura 8 muestro la pantalla de inicio del simulador 3D, la cual contiene todas las herramientas para llevar a cabo las simulaciones.

Las recreaciones deben ser lo más exactas posibles a la realidad para que no se pierda nada de información y nuestros resultados sean similares a las medidas reales.

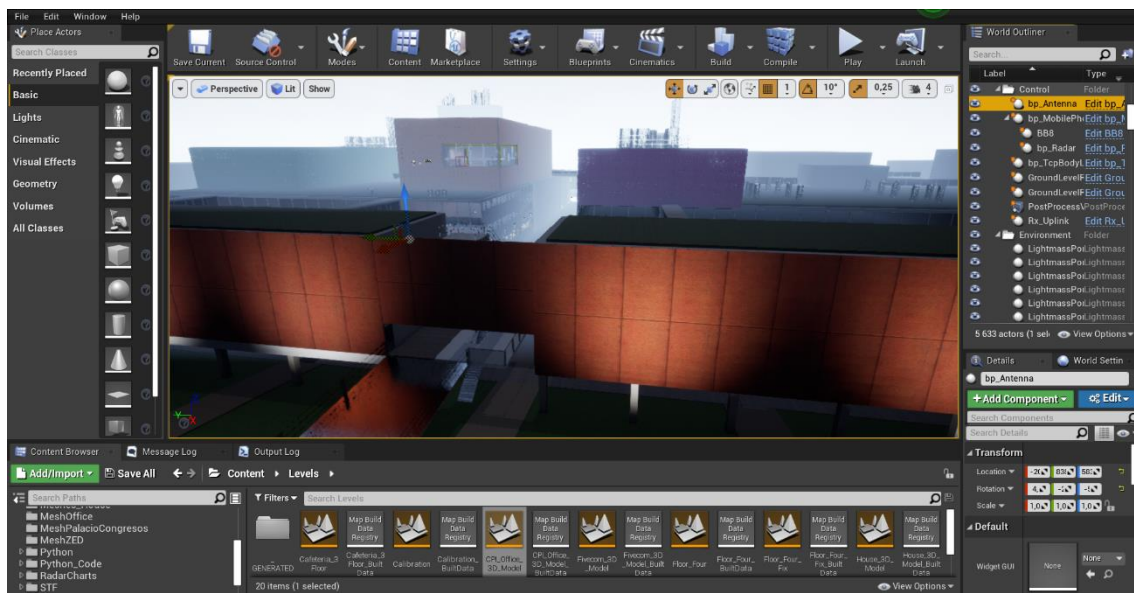


Figura 8. Pantalla del simulador

1. Place Actors.

Esta primera ventana contiene las figuras geométricas para construir los objetos que recrean nuestro escenario, con estas figuras daremos forma a las paredes, suelos, objetos, etc.

En esta primera ventana de trabajo también creamos físicamente las esferas que usaremos como antenas transmisoras y receptoras.

2. Content Browser.

Aquí podremos encontrar los distintos escenarios ya creados para poder cargarlos en el simulador de forma rápida.

3. World Outliner.

Aquí encontramos los objetos que hemos ido creando, ya sean partes del escenario como el suelo, paredes, columnas, etc., al igual que nuestras antenas.

Los objetos más interesantes que podemos encontrar aquí serían nuestros objetos de control:

- Rx_Uplink: Será nuestra antena receptora.

- bp_Rx: Será nuestra antena receptora.
4. Details.
Aquí podemos modificar esos objetos que nos aparecieron en la anterior ventana, es muy útil para poder modificar de forma precisa las coordenadas de nuestras antenas y ajustarlas a las posiciones que nos interesan, al igual que rotar el objeto.
También podemos configurar los objetos para que no intervengan a la hora de realizar la simulación, como pueden ser luces que solo utilizamos para iluminar el escenario, pero no queremos que intervengan como obstáculos cuando realicemos la simulación.
Otra de las opciones importantes de esta ventana es caracterizar el material para que sea más o menos obstructivo cuando los rayos de nuestra antena colisionen con él.
 5. Barra de tareas.
Situada en la parte superior de la pantalla, aquí tenemos las opciones de guardado y el botón de simulación, el cual pulsamos una vez tengamos todo preparado para realizar el proceso final de extracción de datos.
 6. Ventana principal.
Esta será la pantalla donde veremos la recreación del escenario en 3D, aquí podremos mover nuestros objetos pinchando sobre ellos y desplazándolos visualmente por los escenarios, ver en perspectiva como queda el entorno donde queremos realizar la simulación y analizar posteriormente de forma visual cómo se comportan los rayos.
En la Figura 9 podemos ver como un objeto que previamente ha sido seleccionado tiene a su alrededor tres flechitas (roja, verde y azul) que indican los ejes para poder desplazarlo por el escenario.

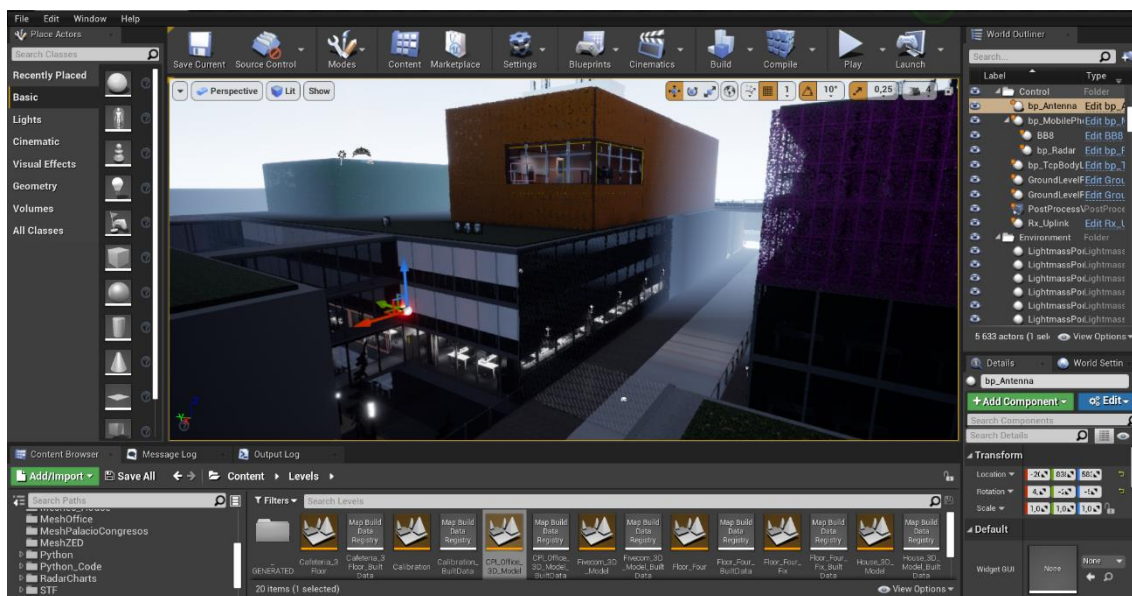


Figura 9. Posicionamiento de objetos

Los parámetros técnicos como frecuencia, tipo de radiación, número de reflexiones, número de transmisiones y nivel de potencia serán configurados en el script Java que soporta este simulador.

3.2 Proceso de simulación

El siguiente paso será realizar una simulación:

Lo primero será elegir el escenario en el que queremos trabajar, ya sea exterior o interior, seguidamente colocaremos la antena transmisora en el lugar donde queremos analizar el canal radio.

Una vez situada nuestra antena transmisora colocaremos tantos receptores como veamos conveniente para realizar la simulación, situando estos en lugares donde nos interese ver como llegarían nuestros rayos pudiendo estar muy escondidos tras los obstáculos y situando otros en lugares donde creamos que los rayos llegarán de una forma más directa.

Una vez tengamos todas las antenas listas solo quedará darle al botón “Play” y ver el comportamiento de los rayos. Algunos de estos rayos llegarán de forma directa, otros colisionarán por distintas partes de nuestro escenario hasta llegar a la antena, viéndose con distintas reflexiones, e incluso podremos tener difracciones si los materiales que obstaculizan las antenas lo permiten.

Una de las capacidades del simulador es la de poder caracterizar las propiedades de los materiales (madera, metal, cristal, etc.) comportándose los rayos de una forma u otra al colisionar y obteniéndose diferentes contribuciones hasta llegar a la antena receptora.

Si tras visualizar la simulación estamos contentos con los resultados solo tendremos que detenerla y extraer el fichero que contiene los datos.

Sin embargo, si tras la simulación no estamos satisfechos con las posiciones en las que hemos colocado las antenas volveremos al inicio y desplazaremos estas nuevamente.

Los tiempos de simulación son muy rápidos siendo inferiores a un minuto, por lo que podemos realizar varias simulaciones en muy poco tiempo.

3.3 Fichero extraído

Una vez realizada la simulación obtenemos un fichero de texto, Figura 10, con los datos de la simulación. Este fichero lo exportaremos a Matlab para poder trabajar con las gráficas del Power Delay Profile.

```
[X=1105.000 Y=1468.000 Z=100.000]
[bp_Rx1_3] [X=1105.000 Y=1468.000 Z=100.000] [Group = 0] [Th = 5] [Ph = 5] [Dist = 3289] [Status = REF] [PowerLevel = -38] [N_Ref = 4] [Phen
[bp_Rx1_3] [X=1105.000 Y=1468.000 Z=100.000] [Group = 0] [Th = 5] [Ph = 10] [Dist = 3327] [Status = REF] [PowerLevel = -47] [N_Ref = 5] [Phen
[bp_Rx1_3] [X=1105.000 Y=1468.000 Z=100.000] [Group = 0] [Th = 5] [Ph = 10] [Dist = 3458] [Status = REF] [PowerLevel = -51] [N_Ref = 6] [Phen
[bp_Rx1_3] [X=1105.000 Y=1468.000 Z=100.000] [Group = 0] [Th = 5] [Ph = 15] [Dist = 3528] [Status = REF] [PowerLevel = -69] [N_Ref = 8] [Phen
[bp_Rx1_3] [X=1105.000 Y=1468.000 Z=100.000] [Group = 0] [Th = 10] [Ph = 10] [Dist = 1827] [Status = REF] [PowerLevel = -25] [N_Ref = 2] [Phen
[bp_Rx1_3] [X=1105.000 Y=1468.000 Z=100.000] [Group = 0] [Th = 10] [Ph = 20] [Dist = 1913] [Status = REF] [PowerLevel = -44] [N_Ref = 4] [Phen
[bp_Rx1_3] [X=1105.000 Y=1468.000 Z=100.000] [Group = 0] [Th = 5] [Ph = 30] [Dist = 2090] [Status = REFDIF] [PowerLevel = -72] [N_Ref = 5] [Phen
[bp_Rx1_3] [X=1105.000 Y=1468.000 Z=100.000] [Group = 0] [Th = 15] [Ph = 35] [Dist = 2276] [Status = REF] [PowerLevel = -64] [N_Ref = 7] [Phen
[bp_Rx1_3] [X=1105.000 Y=1468.000 Z=100.000] [Group = 0] [Th = 15] [Ph = 45] [Dist = 2606] [Status = REF] [PowerLevel = -77] [N_Ref = 9] [Phen
[bp_Rx1_3] [X=1105.000 Y=1468.000 Z=100.000] [Group = 1] [Th = 10] [Ph = -40] [Dist = 2347] [Status = REF] [PowerLevel = -90] [N_Ref = 9] [Phen
[bp_Rx1_3] [X=1105.000 Y=1468.000 Z=100.000] [Group = 1] [Th = 10] [Ph = -35] [Dist = 2336] [Status = REF] [PowerLevel = -76] [N_Ref = 8] [Phen
[bp_Rx1_3] [X=1105.000 Y=1468.000 Z=100.000] [Group = 1] [Th = 10] [Ph = -30] [Dist = 2212] [Status = REF] [PowerLevel = -66] [N_Ref = 7] [Phen
[bp_Rx1_3] [X=1105.000 Y=1468.000 Z=100.000] [Group = 1] [Th = 15] [Ph = -35] [Dist = 2238] [Status = REF] [PowerLevel = -62] [N_Ref = 7] [Phen
[bp_Rx1_3] [X=1105.000 Y=1468.000 Z=100.000] [Group = 2] [Th = 10] [Ph = -45] [Dist = 2405] [Status = REF] [PowerLevel = -65] [N_Ref = 7] [Phen
[bp_Rx1_3] [X=1105.000 Y=1468.000 Z=100.000] [Group = 3] [Th = 20] [Ph = -80] [Dist = 1044] [Status = REFDIF] [PowerLevel = -70] [N_Ref = 2] [Phen
[bp_Rx1_3] [X=1105.000 Y=1468.000 Z=100.000] [Group = 4] [Th = 20] [Ph = -55] [Dist = 542] [Status = REFDIF] [PowerLevel = -54] [N_Ref = 0] [Phen
[bp_Rx1_3] [X=1105.000 Y=1468.000 Z=100.000] [Group = 5] [Th = 25] [Ph = 15] [Dist = 2233] [Status = REFDIF] [PowerLevel = -82] [N_Ref = 9] [Phen
[bp_Rx1_3] [X=1105.000 Y=1468.000 Z=100.000] [Group = 5] [Th = 30] [Ph = 5] [Dist = 3772] [Status = REF] [PowerLevel = -47] [N_Ref = 6] [Phen
[bp_Rx1_3] [X=1105.000 Y=1468.000 Z=100.000] [Group = 5] [Th = 40] [Ph = 5] [Dist = 424] [Status = LOS] [PowerLevel = -3] [N_Ref = 0] [Phenoi
[bp_Rx1_3] [X=1105.000 Y=1468.000 Z=100.000] [Group = 5] [Th = 40] [Ph = 5] [Dist = 424] [Status = LOS] [PowerLevel = -3] [N_Ref = 0] [Phenoi
[bp_Rx1_3] [X=1105.000 Y=1468.000 Z=100.000] [Group = 5] [Th = 40] [Ph = 10] [Dist = 427] [Status = LOS] [PowerLevel = -4] [N_Ref = 0] [Phen
[bp_Rx1_3] [X=1105.000 Y=1468.000 Z=100.000] [Group = 5] [Th = 40] [Ph = 10] [Dist = 427] [Status = LOS] [PowerLevel = -4] [N_Ref = 0] [Phen
[bp_Rx1_3] [X=1105.000 Y=1468.000 Z=100.000] [Group = 5] [Th = 40] [Ph = 5] [Dist = 420] [Status = LOS] [PowerLevel = -3] [N_Ref = 0] [Phenoi
```

Figura 10. Fichero de datos del simulador

Lo primero que vemos son las coordenadas X, Y, Z donde está situada nuestra antena receptora [X=... Y=... Z=...].

En las siguientes líneas encontramos cada uno de los rayos que han llegado a nuestro receptor:

[bp_RxN]: Donde N indica el receptor que estamos viendo.

[X=... Y=... Z=...]: Volvemos a ver la posición relativa que tiene el receptor en el simulador al que ha llegado ese rayo (esta posición solo es útil en el simulador, para posicionar los puntos).

[Group = N]: N indica el grupo de Cluster de Uplink de cada rayo (esta es una agrupación local, no tiene en cuenta el resto de posiciones del bp_RxN), al primer grupo de rayos con características similares le dará el valor 0, al segundo el valor 1 y así sucesivamente.

[Th = N]: N indica la orientación en grados (Theta/Azimet) de un rayo individual de salida del Rx hacia el Tx.

[Ph = N]: N indica la orientación en grados (Phi/Elevación) de un rayo individual de salida del Rx hacia el Tx.

[Dist = N]: N indica la distancia (cm) recorrida por el rayo desde el Rx hasta el Tx (Equivalente a la fase/retardo)

[Status = X]: Indica a qué tipo de fenómeno físico es debida esta contribución. Nos podemos encontrar distintos fenómenos como, reflexión (REF), difracción (DIF), visión directa (LOS), reflexión-difracción (REFDIF), transmisión-reflexión (REFTX).

Este fichero extraído incluye otros datos adicionales como pueden ser el orden en el que suceden cada uno de los fenómenos, los materiales por los que ha colisionado el rayo hasta llegar al terminal, la distancia parcial de cada colisión y las pérdidas en cada uno de los materiales, pero estos datos no son tenidos en cuenta para el objeto de este TFG, ya que nos centramos en la distancia final de cada rayo, el tipo de contribución y la potencia recibida.

3.4 Simulación del fenómeno de transmisión

En este apartado realizaré una simulación con antenas omnidireccionales donde el receptor se encuentre en una posición en la que el rayo tenga que atravesar alguna pared, para ver el comportamiento de la señal a la frecuencia de 27 GHz y comprobar si el fenómeno de transmisión es significativo a esta frecuencia. La posición del transmisor y el receptor se pueden ver en la Figura 11, la antena transmisora se encuentra situada en el interior de la sala y la antena receptora fuera de esta.

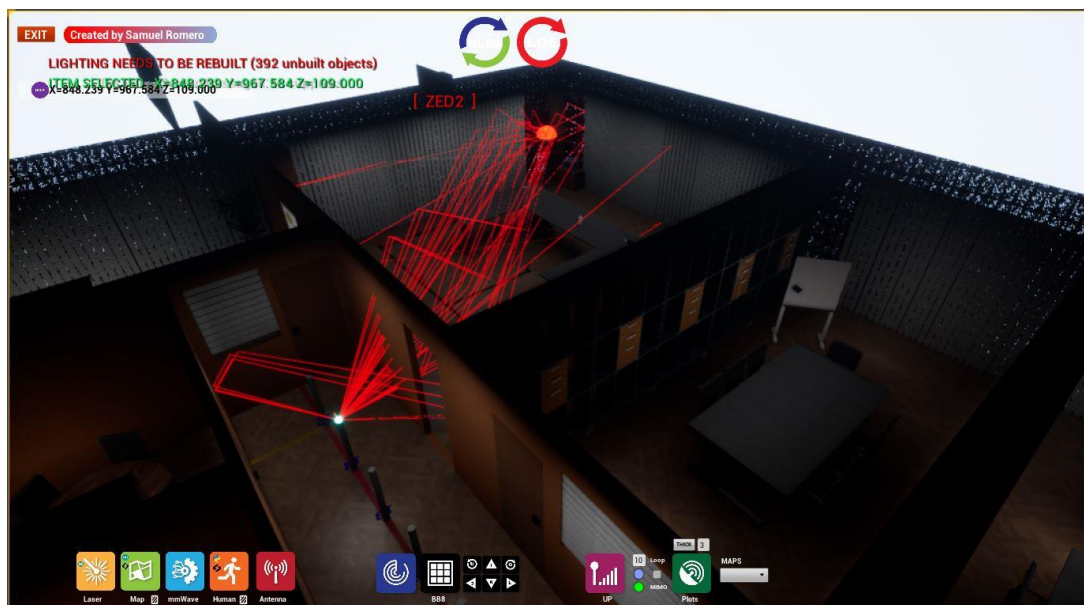


Figura 11. Transmisión de rayos

En la Figura 12 se muestra la PDP utilizando 3 transmisiones y 3 reflexiones. Claramente vemos como las contribuciones procedentes de la transmisión (REFTX, color rojo) sí que son significativas y no las podemos despreciar como varios autores indican en la literatura para estas frecuencias, puesto que estaríamos perdiendo un gran nivel de señal si solo consideramos las transmisiones simples que se dan tras colisionar en la pared del interior de la sala y pasar el rayo por la puerta que se mantiene abierta.

Las primeras contribuciones que llegan al receptor son las que atraviesan la pared y su nivel de señal es muy parecido al que nos da el rayo que tiene una reflexión simple.

Ahora se aumentará el número de transmisiones y reflexiones a 10 en ambos casos, Figura 13, para poder comparar.

Observamos que nos siguen saliendo transmisiones significativas del mismo nivel de potencia que las reflexiones simples en torno a los 80 ns, por lo que es interesante haber aumentado en reflexiones ya que seguimos traspasando la pared y la señal no disminuye considerablemente al aumentar el número de rebotes.

Se puede apreciar el término “Cluster”, que explicado brevemente serían agrupaciones de rayos que sufren fenómenos muy parecidos y llegan en instantes de tiempo muy similares al terminal, podemos ver un primer grupo en las primeras contribuciones que llegan procedentes de la transmisión, tras una pequeña caída nos aparece un segundo grupo de rayos procedentes de reflexiones simples y un tercer grupo en torno a los 80 ns. Este fenómeno aparece en casos donde la antena receptora se encuentra cerca de una esquina o parecido y los rayos se reflejarán en posiciones muy parecidas antes de llegar al terminal.

Por lo tanto, aumentar el número de reflexiones es interesante ya que a pesar de tener un mayor número de rebotes seguimos teniendo niveles de señal parecidos en instantes posteriores de tiempo, sin embargo, aumentar el número de transmisiones no es importante puesto que la señal al incidir en más de dos materiales es tan atenuada que es depreciable para el receptor.

Por último, indicar que nuestra contribución más significativa está perdiendo 73 dB de potencia respecto a la potencia que hayamos transmitido y si para un ancho de banda de 400 MHz tenemos un umbral de ruido de -88 dBm, si por ejemplo marcamos una potencia de transmisión de 0 dBm vamos a tener nuestro rayo con mayor energía en -73 dBm, lo que nos daría un margen de solo 15 dB para señales con potencia útil, que por lo que vemos en la PDP nos llegarán muy pocas contribuciones significativas dentro de este intervalo, por lo que tendremos que marcar una

potencia mayor, si pusiéramos 20 dBm de potencia transmitida ampliaremos ese margen a 35 dB y tendremos un mayor número de contribuciones que superan ese umbral de -88 dBm.

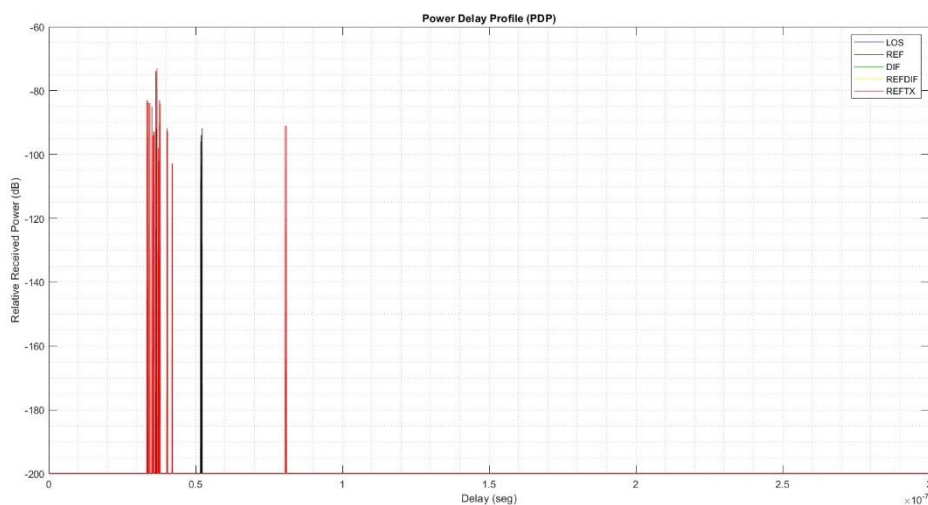


Figura 12. PDP en transmisión con 3 REF y 3 TX

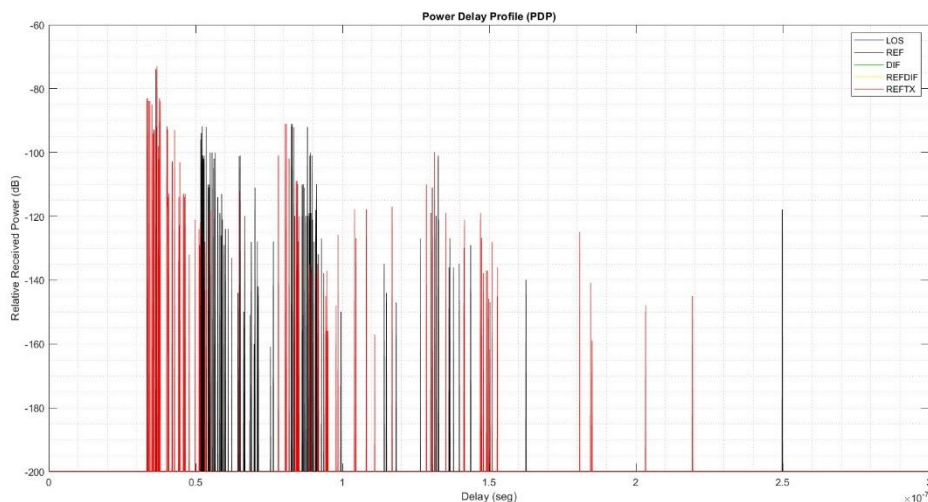


Figura 13. PDP en transmisión con 10 REF y 10 TX

3.5 Simulación en el interior de la sala

En este apartado mostraré varias simulaciones realizadas en el interior de la sala y analizaré como varía el perfil de retardo de potencia (PDP) del canal radio al modificar el número de transmisiones y reflexiones que previamente fijaremos en el simulador.

En la Figura 14 podemos ver una simulación donde se han usado 1 transmisión y 1 reflexión para la posición 5 de la sala, la cual se encuentra entre una mesa y una pared, lo que puede ser interesante para comprobar si aparecen contribuciones que pertenecen a difracciones y transmisiones.

Se ha marcado un umbral de 30 dB por debajo de la contribución principal (mayor potencia) para separar los niveles de señal que se pueden despreciar sin mucho error.

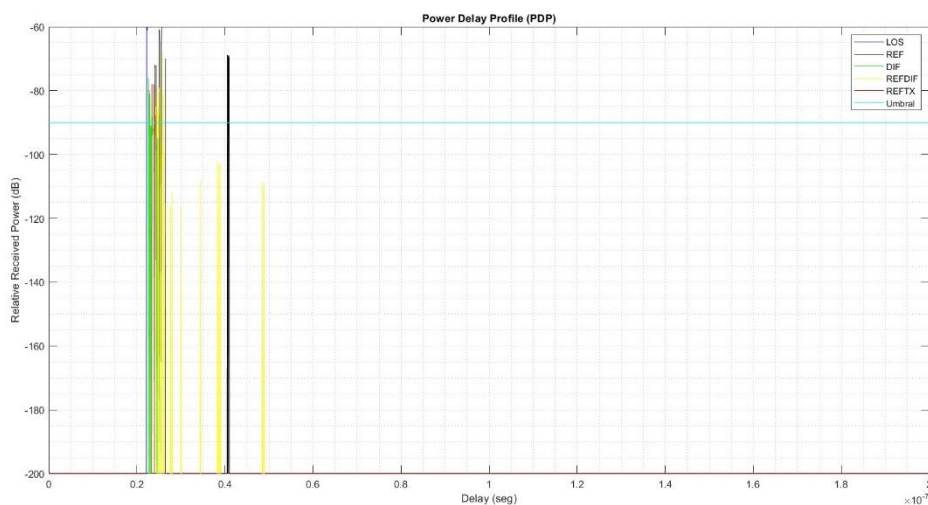


Figura 14. Simulación PDP posición 5 con 1TX y 1 REF

Podemos observar las diferentes contribuciones que llegan al receptor, el nivel de potencia de cada una de ellas varía según el tipo fenómeno que sufren.

Vemos que la línea de visión directa (LOS, color azul) es la primera en llegar, evidentemente, ya que el rayo no sufre ninguna colisión, este rayo tarda en torno a los 22 ns, lo que equivale a unos 6'60 m de distancia entre la antena transmisora y la receptora.

En cuanto a rayos que colisionan con objetos encontramos primeramente difracciones producidas por los bordes de las mesas que llegan directamente al receptor (DIF, verde), rayos que tras difractar en la mesa refractan en el suelo o en el techo (REFDIF, amarillo), rayos que traspasan las mesas y tras un rebote en el suelo llegan al terminal (REFTX) y simples reflexiones (REF, negro) en la pared, techo o mesas. Se puede destacar que las contribuciones más significativas son la visión directa y las reflexiones, ya que tienen los mayores niveles de potencia, pero se puede comprobar que las contribuciones que pertenecen a las difracciones y transmisiones sí deben ser tenidas en cuenta porque siguen llegando al receptor con un nivel de potencia significativo.

En la Figura 15 han sido utilizadas 3 transmisiones y 3 reflexiones, esto hace que los rayos puedan llegar al receptor tras colisionar hasta tres veces y ser transmitidos por hasta tres materiales.

Lo primero que salta a la vista es que tenemos contribuciones significativas en retardos entre 60 y 80 ns, equivalente a 18 y 24 m, debido a que los rayos pueden hacer un mayor recorrido por la sala hasta llegar al terminal sin ser muy atenuados. Los niveles de señal de todos los rayos procedentes solo de reflexiones siguen siendo importantes por lo que no podemos despreciar contribuciones con tres reflexiones.

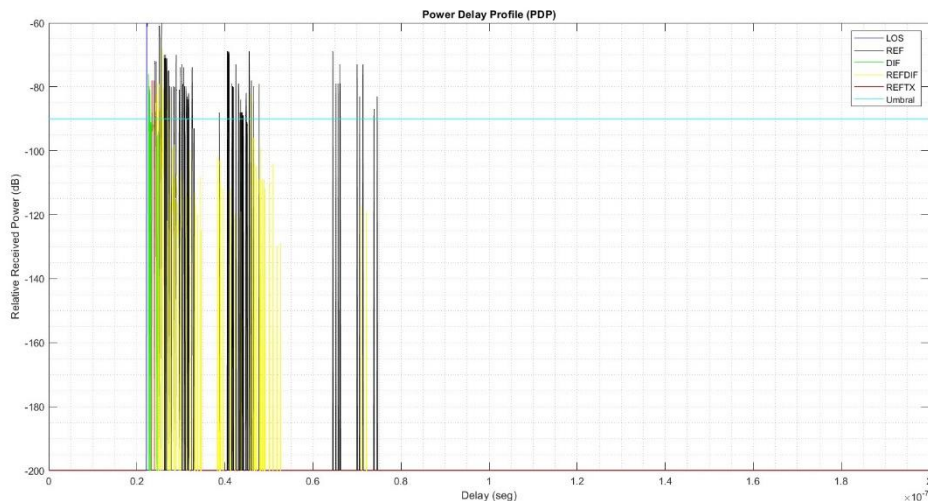


Figura 15. Simulación PDP posición 5 con 3 TX y 3 REF

En la Figura 16 se han configurado los rayos para que sean capaces de tener 5 transmisiones y 5 reflexiones.

Comparando esta con las anteriores vemos que ahora tenemos contribuciones en 120 ns, unos 36 m, estos rayos ya recorren distancias demasiado grandes como para llegar al receptor con suficiente nivel de potencia. Obtenemos alguna nueva contribución difractada cerca de los 100 ns, pero muy atenuada debido a que el rayo ha sido difractado y posteriormente reflejado en dos o tres materiales.

Hemos aumentado el número de transmisiones, pero no vemos rayos nuevos que lleguen tras este fenómeno debido a que al traspasar más de uno o dos materiales la señal llega tan atenuada que es despreciada por el simulador.

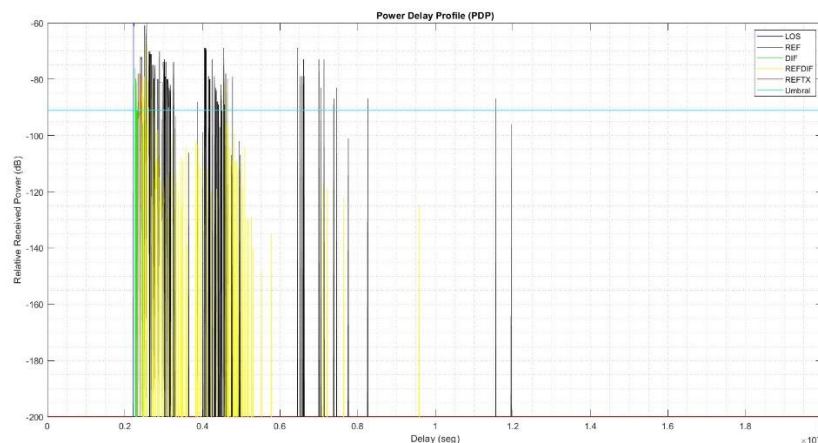


Figura 16. Simulación PDP posición 5 con 5 TX y 5 REF

En la Figura 17 se muestra la simulación con 10 transmisiones y 10 reflexiones. Aquí ya tenemos mayor número de contribuciones, pero no son significativas puesto que sí que vemos un importante cambio en el número de rayos, encontramos rayos entre 120 y 150 ns (36 y 45 m, respectivamente), pero la mayoría con muy poco nivel de potencia que no superan el umbral fijado.

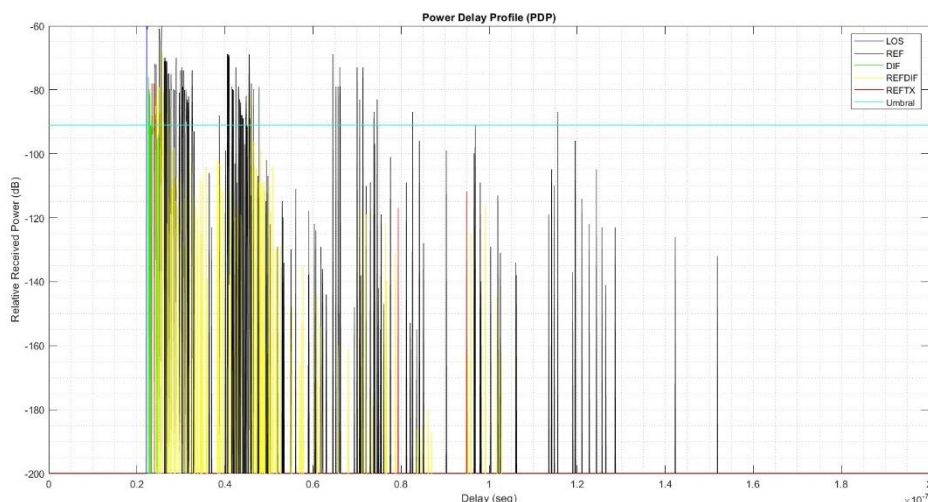


Figura 17. Simulación PDP posición 5 con 10 TX y 10 REF

Vamos a analizar el comportamiento para una posición distinta, esta vez para la posición 7 que sería la de mayor distancia entre antenas.

En la Figura 18 utilizaremos 1 transmisión y 1 reflexión y la compararemos con la Figura 19 donde usamos 10 transmisiones y 10 reflexiones.

Comprobamos que en la primera gráfica tanto la línea de visión directa, las difracciones en los bordes de la mesa, las reflexiones simples en alguna de las paredes, mesas, suelo o techo son significativas y superan el umbral de 30 dB.

La línea de visión directa nos llega en 23 ns, lo que equivale a una separación entre antenas de 6'9 m, encontramos reflexiones con niveles de señal prácticamente idénticos a la visión directa, y ya más atenuadas tenemos las difracciones y algunas reflexiones.

Se puede comprobar que, aunque hayamos aumentado la distancia entre antenas las difracciones siguen siendo interesantes y no pueden ser despreciadas.

Al aumentar el número de transmisiones y reflexiones en la siguiente gráfica vemos que el nivel de señal decae rápidamente, sí que aumentamos el número de contribuciones significativas en los primeros intervalos de tiempo entre 20 y 40 ns, posiblemente de rayos que reflejan en dos o tres materiales y difracciones al borde de la mesa que reflejan en suelo o techo antes de llegar al terminal.

A partir de los 40 ns solo vemos alguna contribución significativa en torno a los 70 ns, pero el resto no llegan a ser interesantes. Esto se debe a que hemos aumentado la distancia entre antenas introduciendo así una mayor atenuación por distancia respecto a la posición analizada anteriormente, y si además los rayos tienen que reflejar en varios obstáculos ya estamos atenuando mucho la señal.

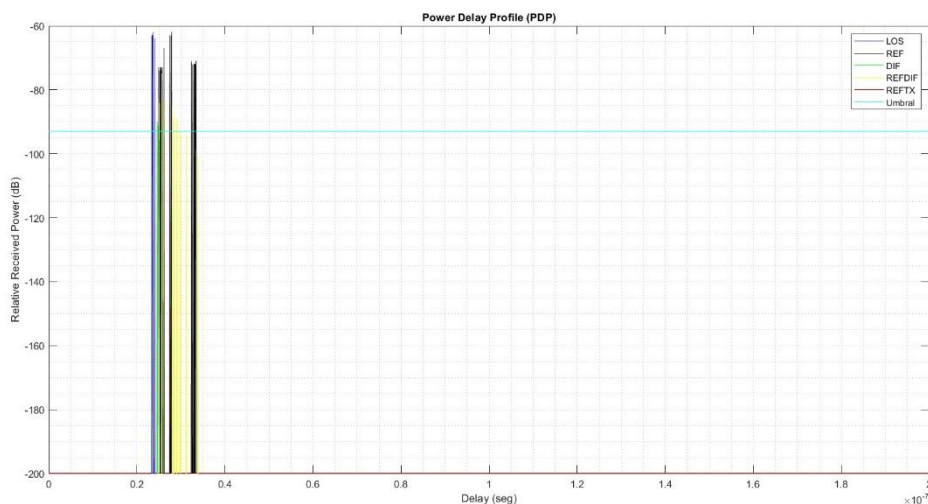


Figura 18. Simulación PDP posición 7 con 1 TX y 1 REF

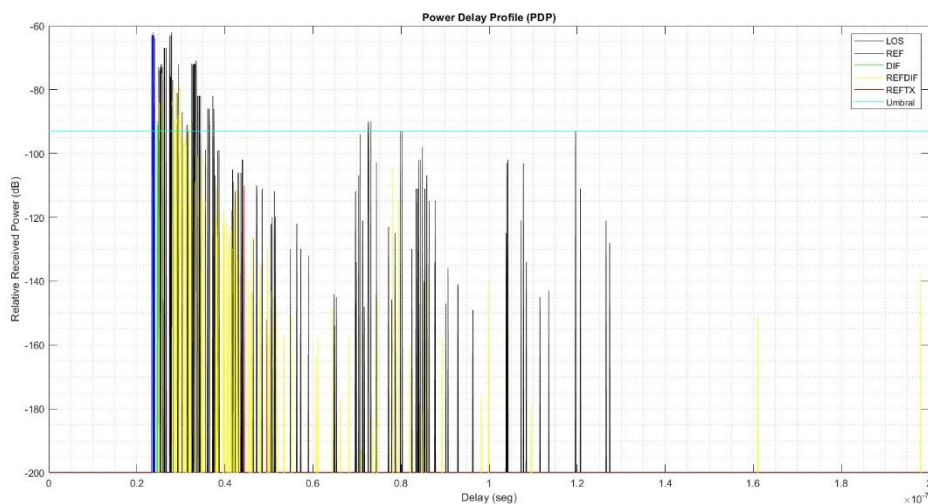


Figura 19. Simulación PDP posición 7 con 10 TX y 10 REF

La última simulación que mostraré en este capítulo será en la posición 3 para ver si la señal decae tan rápidamente como en la posición anterior.

En la Figura 20 se muestra la PDP de la posición 3 con 3 transmisiones y 3 reflexiones.

Vemos que para esta posición el nivel de señal sigue siendo interesante durante un periodo de tiempo mayor que en la anterior. La visión directa la recibimos en 16 ns, una distancia de 4'8 m entre antenas, siendo en este caso superior a los niveles que obtenemos tras las reflexiones.

Se aprecia como seguimos teniendo grupos de reflexiones con niveles de potencia muy parecidos entre los rayos que llegan en el intervalo de 16 y 30 ns y los que llegan entre 45 y 55 ns, ya que hay una distancia entre ellos de unos 10 m, lo que quiere decir que los rayos que reflejan en dos o tres materiales siguen teniendo una potencia parecida a los que solo colisionan una vez.

También vemos que tenemos varias difracciones, pero en su mayoría el nivel de potencia llega muy atenuado al receptor.

En cuanto a la Figura 21 se ha aumentado a 10 el número de transmisiones y reflexiones, pudiendo ver un mayor número de rayos que llegan al receptor. La mayoría de estos rayos no tienen un

nivel de potencia significativo debido a que la distancia que recorren es demasiado grande como para llegar al receptor con una potencia útil, tampoco se aprecian contribuciones procedentes de transmisiones ni difracciones significativas.

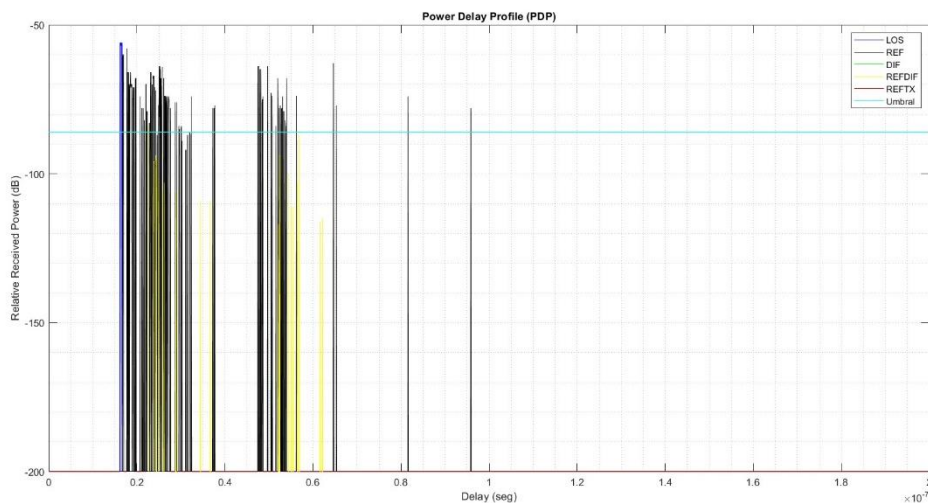


Figura 20. Simulación PDP posición 3 con 3 TX y 3 REF

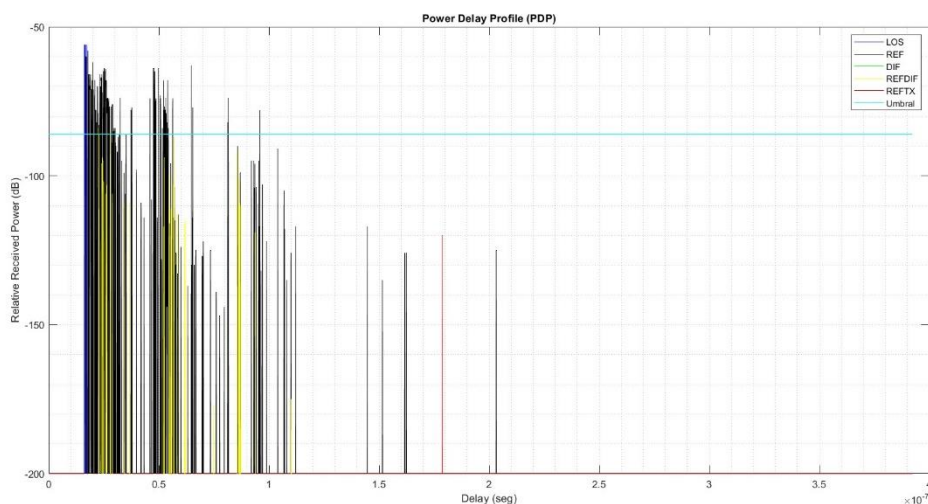


Figura 21. Simulación PDP posición 3 con 10 TX y 10 REF

En conclusión, podemos decir que sí que hay que tener en cuenta efectos como difracción y transmisión ya que tienen niveles de potencia significativos para estas frecuencias en lugares donde estos fenómenos son simples, es decir que la señal solo sea difractada y llegue al terminal o sea difractada y reflejada solo una vez. Al igual pasa con la transmisión si el rayo traspasa un objeto y se refleja solo una vez sí que nos dará una contribución a tener en cuenta, no obstante, hemos visto como al tener varias reflexiones tras una difracción o una transmisión la señal ya está muy por debajo de los 30 dB que se han marcado como umbral.

En cuanto al número de reflexiones hemos visto que el número de contribuciones significativas aumentaba al pasar de una reflexión a tres reflexiones, incluso cuando aumentábamos a cinco reflexiones aparecían contribuciones de interés, sin embargo, al aumentar a diez reflexiones todas las contribuciones que obteníamos eran muy atenuadas, más de 30 dB por debajo de la contribución principal, debido a la distancia que recorrían y las pérdidas de la propia reflexión.



El aumentar el número de transmisiones no era interesante pues no llegábamos a ver contribuciones que incidieran en más de uno o dos materiales, puesto que si lo hacían el nivel de señal era despreciado por el simulador debido a su gran atenuación.

Capítulo 4. COMPARATIVA DE MEDIDAS Y SIMULACIÓN

4.1 Comparativa

En este capítulo vamos a llevar a cabo el análisis de la comparativa entre las medidas realizadas con el analizador de redes y las simulaciones obtenidas, comprobaremos si el simulador nos da una señal que se asemeja a las medidas reales.

Para las mediciones se han elegido una altura de la antena transmisora de 1'60 m y 1 m para la antena receptora, ambas omnidireccionales, y se marcará un umbral 30 dB por debajo de la contribución principal con el que se quiere indicar que todos los rayos que sean inferiores no se consideran contribuciones significativas en el Power Delay Profile.

Vamos a comenzar analizando la posición 8 de la sala y posteriormente compararemos el Power Delay Profile de las medidas reales con el obtenido en el simulador.

La posición 8 es la más cercana al transmisor, las antenas transmisora y receptora se encuentran a 3 m de distancia y no se encuentran obstáculos entre una y otra, por lo que deberíamos encontrar una clara contribución en la visión directa y altos niveles de señal para las reflexiones cercanas a las antenas.

En la Figura 22 se muestra esta comparativa utilizando 10 reflexiones y 10 transmisiones en el simulador, lo primero que salta a la vista es que la simulación muestra la misma apariencia que las medidas reales y la apreciación de los clusters de rayos que pinta el simulador recaen en las contribuciones principales de la medida.

Podemos observar como el rayo que pertenece a la línea de visión directa llega en el mismo instante de tiempo y con el mismo nivel de señal que el primer pico de la medida, por lo que en cuanto a este fenómeno sí que conseguimos una contribución correcta.

Luego tenemos un segundo grupo de contribuciones debidas a las reflexiones en torno a los 35 ns, con un nivel de potencia de -60 dB, que por el instante de tiempo en el que aparecen y su energía serán rayos que reflejan en alguno de las paredes y llegan al terminal sin haber perdido gran cantidad de potencia. El simulador también coincide en los siguientes dos picos de potencia situados en 50 ns, por lo que podemos comprobar que para las contribuciones más importantes sí que es capaz de situar rayos con un nivel de potencia parecida al de la medida real.

Por el contrario, vemos como se pierde el pico situado en 22 ns, justo después de la visión directa y una gran cantidad de señal útil entre los 65 ns y los 114 ns, donde sí vemos que llegan contribuciones, pero no con el nivel de potencia correcto, por lo que el simulador está perdiendo información útil. A partir de los 114 ns ya no tenemos prácticamente rayos en la simulación, esto puede ser debido a una de las características que tiene el simulador, el cual no tiene en cuenta rayos que llegan con un nivel de potencia 99 dB por debajo de la contribución principal, esto no tiene gran importancia puesto que la señal que llega a partir de ese instante ya se encuentra por debajo del umbral que hemos marcado, los rayos que llegan en esos instantes ya equivalen a distancias superiores a los 40 m y para estas bandas de frecuencia la señal llega muy atenuada al realizar esos recorridos.

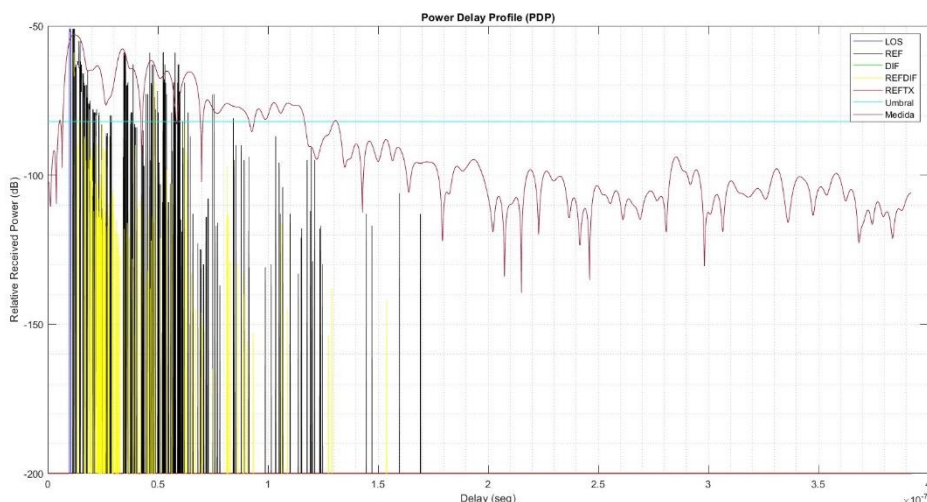


Figura 22. Comparación en la posición 8

Hay tres razones por las que el simulador no va a dar una medida perfecta:

- La primera de ellas sería porque estamos limitados en ancho de banda, $BW = 400$ MHz, por lo que tenemos una resolución temporal de

$$\Delta\tau = \frac{1}{BW} = 2.5 \text{ ns} \quad (4.1)$$

Por lo tanto, la medida va a combinar todos los rayos que se encuentren dentro de esa ventana de 2.5 ns, sumándolos en módulo y fase. Esto se puede ver en la Figura 23, donde ese pico que vemos que la simulación no lo percibe puede ser debido a ese enventanado de 2.5 ns donde la medida real suma en módulo y fase los rayos que llegan en ese periodo de tiempo.

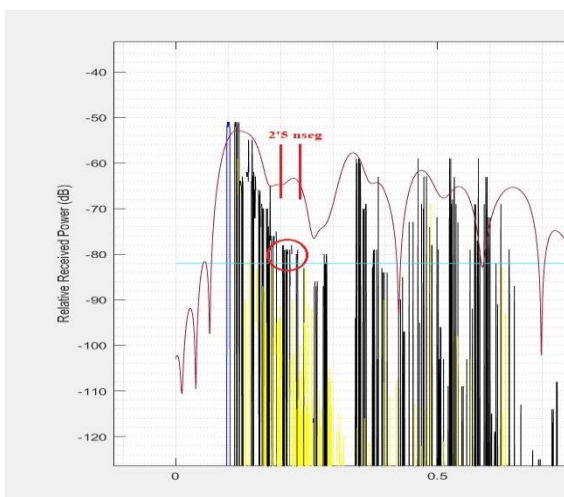


Figura 23. Enventanado de 2.5 ns

- La segunda razón es que esa información de fase no está disponible en el simulador y en las medidas sí. Esto se puede ver en la Figura 24, donde se aprecia que en la media hay una especie de nulo y en el simulador vemos rayos con gran amplitud, pues puede ser debido a que estos rayos en la medida están sumados en contrafase y en el simulador no tenemos esa información.

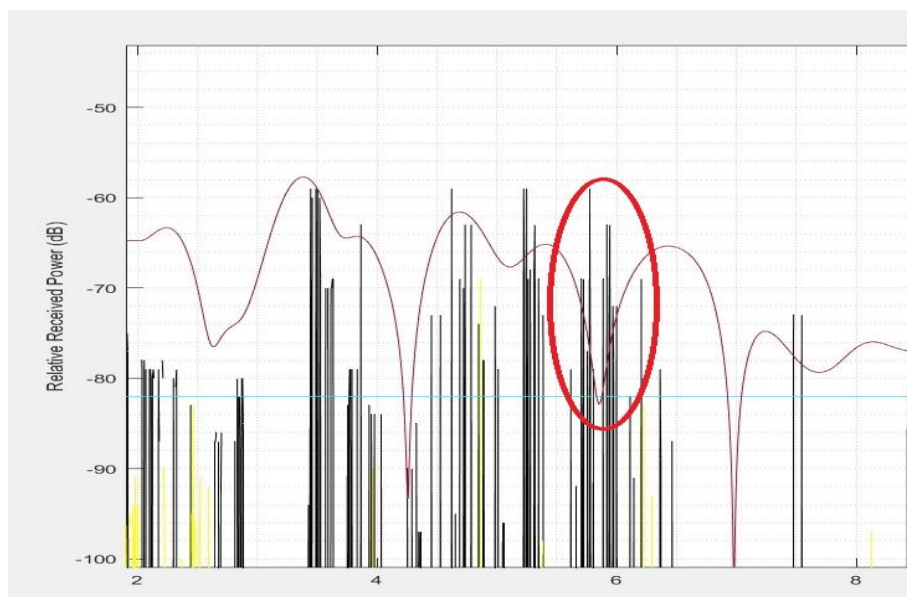


Figura 24. Suma en contrafase

- La tercera razón es que no podemos tener una representación 3D perfecta de absolutamente todos los detalles que hay en el entorno. Nosotros hacemos una recreación lo más perfecta posible, pero esto no deja de ser una aproximación.

En la Figura 25 vemos como quedan los rayos descartando todas las contribuciones por debajo del umbral que hemos marcado, observando que el simulador está bastante conseguido para caracterizar los rayos con energía significativa y se pueden apreciar a qué son debidos cada una de las contribuciones, esto es lo más importante, encontrar las posiciones en las que llegan estos rayos, la distancia que han recorrido, poder ver gráficamente cuantas reflexiones ha sufrido el rayo y poder caracterizar el tipo de fenómeno que ha sufrido, esta es la ventaja que tiene el simulador y puede servir para planificar y gestionar las redes basadas en 5G.

En esta gráfica observamos un rayo que pertenece a una difracción, en 50 ns, por lo que podemos comprobar que sí que hay que tener en cuenta este tipo de fenómenos y no pueden ser despreciados.

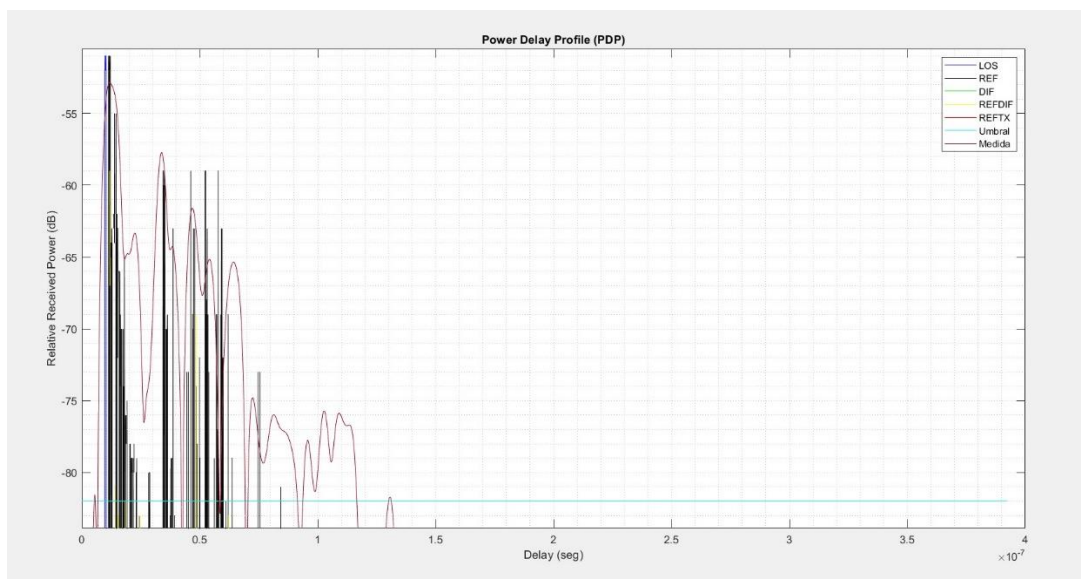


Figura 25. Contribuciones por encima del umbral

La siguiente posición a analizar será la 6, Figura 26, esta posición se encuentra 3 m más distanciada de la antena transmisora que la posición que hemos analizado antes. Apreciamos esos primeros rayos de visión directa y reflexiones que aparecen al colisionar con la pared que tiene al lado la antena, luego encontramos un segundo pico que no llegamos al nivel de potencia, pero sí que encontramos los rayos que caen en ese instante, por lo que puede ser debido a esos inconvenientes de fase que he comentado anteriormente.

El tercer grupo de contribuciones interesante sería el que se encuentra entre 50 ns y 70 ns donde sí que el simulador dibuja las contribuciones correctamente.

En la Figura 27 quiero analizar esos niveles de señal que el simulador está perdiendo, en un primer rectángulo rojo se aprecia un pico con mayor nivel de energía que la obtenida en el simulador, vemos que este pico es debido a una gran cantidad de contribuciones procedentes de reflexiones, no más de una o dos colisiones antes de llegar a la antena por el instante de tiempo en el que aparecen, que seguramente realizando un enventanado de 2'5 ns y sumando en módulo y fase todas ellas conseguiríamos llegar, luego vemos una caída de señal que procede de la llegada de rayos difractados muy cerca de la antena que aplicando la misma solución que antes nos podría dar la potencia de la medida, por lo que es necesario tener en cuenta estas difracciones. En el rectángulo azul vemos un cuarto pico en 74 ns que el simulador no es capaz de llegar en potencia, en ese instante tenemos gran cantidad de contribuciones por lo que posiblemente sí que conseguiríamos representarlo con el enventanado.

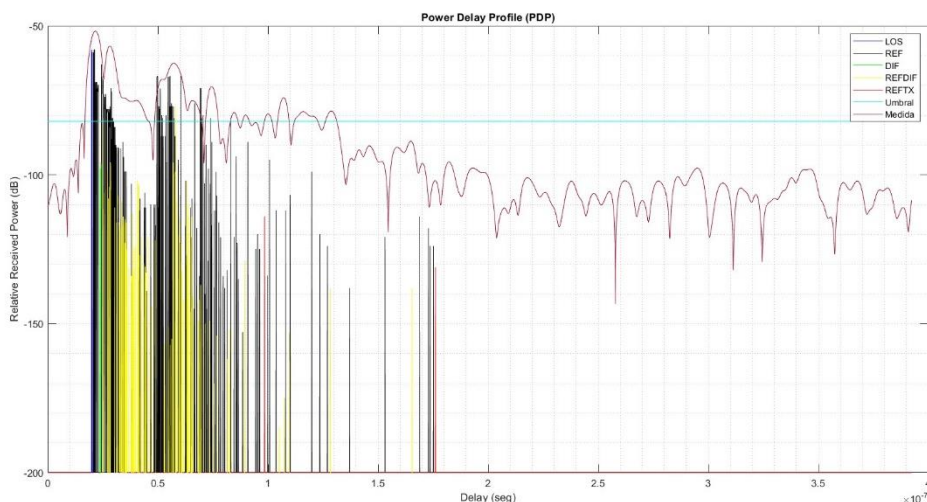


Figura 26. Comparación en la posición 6

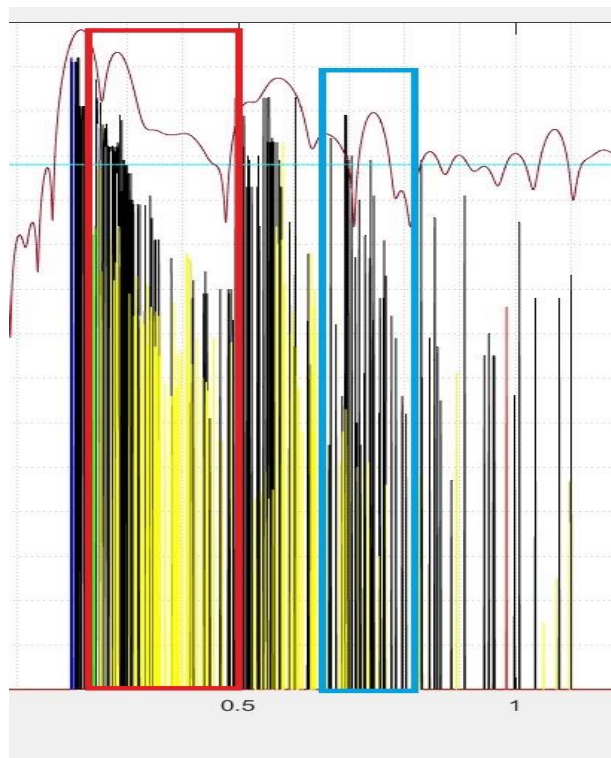


Figura 27. Análisis posición 6

Ahora vamos a analizar la posición 4, la característica de esta es que se encuentra rodeada de mesas que pueden hacer que veamos un mayor número de rayos en transmisión y difracción.

En la Figura 28 se puede ver esta comparativa, donde comprobamos varios clusters de rayos en las posiciones más significativas y una línea de visión directa que debería ser un poco inferior.

En cuanto a la transmisión, Figura 29, podemos comprobar que sí que tenemos varias contribuciones (color rojo) con un nivel de potencia significativo, por lo que no podemos despreciarlas, vemos que llegan muy cerca de la línea de visión directa y serán debido a que atraviesan la mesa y tras rebotar en el suelo llegan a la antena. Posteriormente vemos los dos últimos picos por encima del umbral en la medida real en torno a los 75 ns y los 120 ns, en estos instantes vemos que sí que tenemos niveles de potencia significativa en la medida real, por lo que estas contribuciones procedentes de las transmisiones sumadas en fase con las procedentes de reflexiones nos darían esos picos que no es capaz de dibujar el simulador.

Por la posición de la antena también se ve claramente una gran cantidad de difracciones (color amarillo) en los bordes de la mesa que no podemos dejar de tener en cuenta, pues la gran mayoría de los rayos que vemos en el primer intervalo de tiempo son debidos a este fenómeno.

En torno a los 40 ns vemos un cluster muy significativo debido a reflexiones que recae en uno de los picos más importantes de la medida. Seguido a este viene un pico que no llegamos en potencia, pero al sumar en fase sí que es posible que lo obtuviéramos, porque las contribuciones de estos rayos sí que las tenemos.

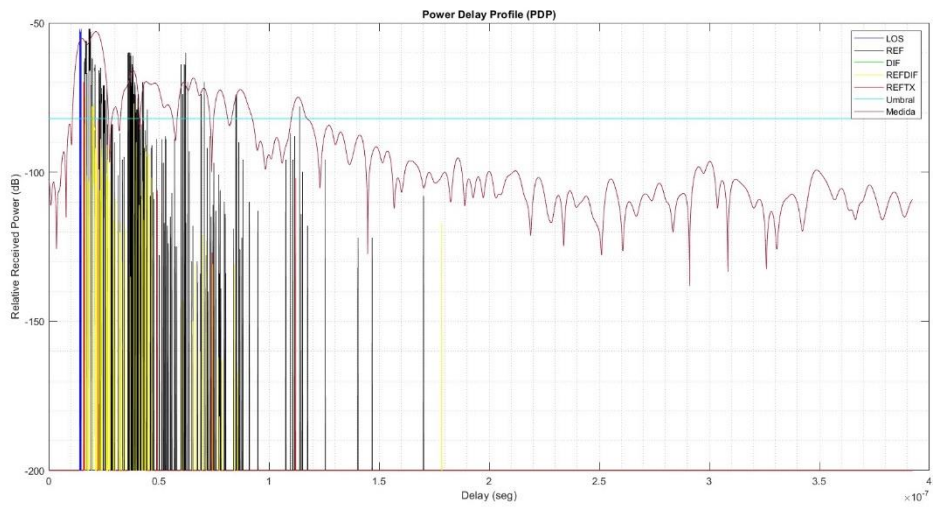


Figura 28. Comparativa medida y simulación posición 4

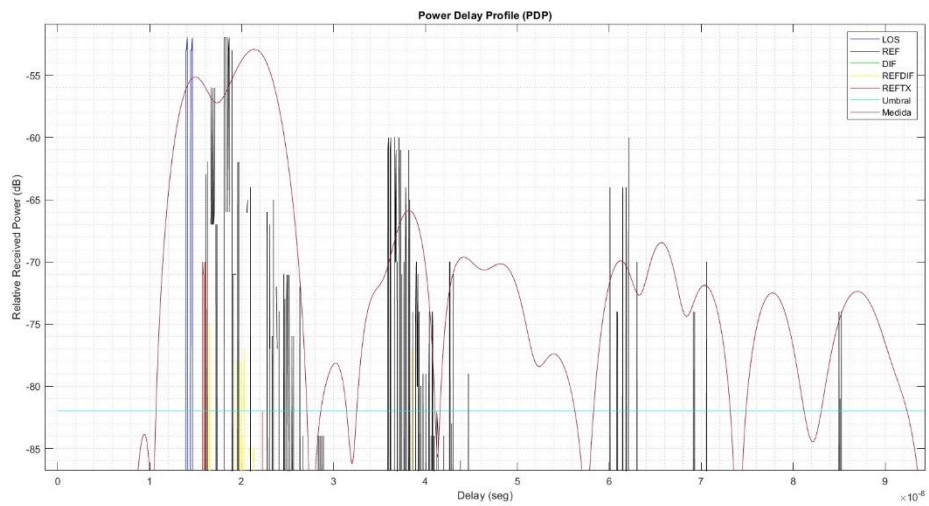


Figura 29. Análisis en posición 4

Capítulo 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se han realizado medidas con un analizador de redes y simulaciones con un simulador de trazado de rayos, ambas en interior, para ser comparadas y poder analizar el comportamiento del canal radio en la banda de frecuencias milimétricas donde se sitúa la tecnología 5G.

Se ha pretendido comprobar si es correcto decir que para estas bandas de frecuencias las únicas contribuciones importantes son la visión directa y una o dos reflexiones, como escriben muchos autores, despreciando así transmisiones y difracciones.

Para analizar el fenómeno de la transmisión sobre obstáculos se ha situado la antena receptora separada de la antena transmisora por una pared de madera y comprobar así si los rayos son capaces de traspasar obstáculos en bandas de frecuencia milimétricas. Este análisis ha sido satisfactorio puesto que se ha comprobado que las contribuciones procedentes de la transmisión llegaban con un nivel de potencia mayor que las reflexiones simples.

En la comparación de medidas y simulaciones se ha querido comprobar si el simulador es útil y si las contribuciones producidas por fenómenos como transmisión y difracción son significativas para estas frecuencias.

Como principales conclusiones del análisis realizado podemos decir que:

- En estas bandas de frecuencias los rayos sí que pueden atravesar obstáculos y llegar con niveles de potencia mayores incluso que las reflexiones.
- La transmisión y la difracción sí que aparecen en estas frecuencias y no pueden ser despreciadas puesto que sus contribuciones sí que son significativas.
- Hemos comprobado que no basta solo con analizar rayos con una o dos reflexiones porque nos estaremos perdiendo una parte importante de la señal, por lo que calcular múltiples reflexiones sigue siendo importante.

Esto va a ayudar a que el canal se modele de forma más sofisticada, no limitándose a la visión directa y una sola reflexión porque apenas conseguimos información del canal todavía.

Posiblemente en bandas de frecuencia muy superiores esto cambie y ya sí que sean despreciables las contribuciones procedentes de difracciones, porque los objetos sean aparentemente más grandes comparados con las longitudes de onda, y las transmisiones a través de obstáculos serán muy atenuadas, por lo que apenas habrá rayos que tengan nivel significativo en transmisión.

Se ha podido comprobar la utilidad del simulador para ver visualmente el tipo de fenómenos que sufren los rayos a estas frecuencias y ver que sus simulaciones se asemejan mucho a las medidas, aunque no es perfecto puede darte mucha información del canal a analizar, esto nos puede ayudar a planificar las redes basadas en 5G y los sistemas de banda ancha que operan en estas bandas de frecuencias.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] David Tse y Pramod Viswanath. “*Fundamentals of Wireless Communication*”. Cambridge University Press, 2005. ISBN: 9780521845274
- [2] Theodore S. Rappaport. “*Wireless Communications: Principles and Practice*”. Prentice Hall, 1996. ISBN: 9780133755367
- [3] Rohde & Schwarz. “R&S ZNB/ZNBT User Manual”. Junio de 2022. Disponible en: www.rohde-schwarz.com/
- [4] Concepción García Pardo. “*Experimental characterization of the radio channel for systems with large bandwidth and multiple antennas*”. Tesis doctoral. Febrero de 2012. DOI: 10.31428/10317/2510.

ANEXO 1. CÓDIGO MATLAB PARA COMPARACIÓN DE MEDIDAS

```
opts = delimitedTextImportOptions("NumVariables", 13, "Encoding", "UTF16-LE");

% Specify range and delimiter
opts.DataLines = [1, Inf];
opts.Delimiter = [" ", "[", "]", " "] [" ", "_____"];

% Specify column names and types
opts.VariableNames = ["Var1", "RXnumber", "Position", "Var4", "Group", "Var6", "Th", "Var8", "Ph", "Var10", "Dist", "Var12", "Status", "Var14", "PowerLevel"];
opts.SelectedVariableNames = ["RXnumber", "Position", "Group", "Th", "Ph", "Dist", "Status", "PowerLevel"];
opts.VariableTypes = ["string", "double", "categorical", "string", "double", "string", "double", "string", "double", "string", "double", "string", "categorical", "string", "double"];

% Specify file level properties
opts.ExtraColumnsRule = "ignore";
opts.EmptyLineRule = "read";

% Specify variable properties
opts = setvaropts(opts, ["Var1", "Var4", "Var6", "Var8", "Var10", "Var12"], "WhitespaceRule", "preserve");
opts = setvaropts(opts, ["Var1", "Position", "Var4", "Var6", "Var8", "Var10", "Var12", "Status"], "EmptyFieldRule", "auto");
opts = setvaropts(opts, "RXnumber", "TrimNonNumeric", true);
opts = setvaropts(opts, "RXnumber", "ThousandsSeparator", ",");

% Import the data
T = readtable("C:\Users\Usuario\Desktop\Jose\TFG\1m\tx1_pos9_10TXRX.txt", opts); % Cargamos el fichero
T = sortrows(T, 'Dist', 'ascend'); % Ordenamos el fichero por la variable distancia
% T = readtable("C:\Users\Usuario\Desktop\Jose\TFG\DataGroupsUp_LargeRoom.txt", opts);
```

Nueva matriz

```
RX = T.RXnumber(end-1); % Número de receptores
filas = numel(T.RXnumber); % Numero de filas

clear all_sum;
clear max_rays;

max_rays = filas-1; % Solo hay un receptor, todas sus contribuciones

% Crea la matriz con el numero de rayos para cada receptor
distancia = zeros(RX, max_rays);
Prx = zeros(RX, max_rays);

distancia = T.Dist(1:filas-1);

Prx = T.PowerLevel(1:filas-1)-58; % Potencia recibida en dB
Prx_lin = 10.^(Prx/10); % Prx en mW
```

Calculo del Delay

```
Tau = ((distancia./100)/3e8); % d/c (m/seg) Retardo

% Cargar medidas reales
S2116mpos3_1 = S2116mpos3(1729:8000); % Suprimir la conexión fibra-antena
S2116mpos3_boc_1 = S2116mpos3_boc(1729:8000);
S2116mpos4_1 = S2116mpos4(1729:8000); % Le quitamos la parte que introduce la fibra a la medida
S2116mpos4_boc_1 = S2116mpos4_boc(1729:8000);
S2116mpos5_1 = S2116mpos5(1729:8000);
S2116mpos5_boc_1 = S2116mpos5_boc(1729:8000);
S2116mpos6_1 = S2116mpos6(1729:8000);
S2116mpos7_1 = S2116mpos7(1729:8000);
```



```
S2116mpos7_boc_1 = S2116mpos7_boc(1729:8000);
S2116mpos8_1 = S2116mpos8(1729:8000);
S2116mpos9_1 = S2116mpos9(1729:8000);

time2 = time(1:6272);
time2 = time2.';

UmbralRuido = ones(size(time2));
UmbralRuido = (Prx(1)-30).*UmbralRuido;

%Medidas simulación
% Bucles para diferenciar contribuciones
PosDif = zeros(size(Tau));
for d = 1:filas %Difracciones
    if T.RXnumber(d) == 1
        if T.Status(d) == "DIF"
            PosDif(d) = 10.^(Prx(d)/10);
        end
    end
end

PosRef = zeros(size(Tau));
for e = 1:filas %Reflexiones
    if T.RXnumber(e) == 1
        if T.Status(e) == "REF"
            PosRef(e) = 10.^(Prx(e)/10);
        end
    end
end

PosLos = zeros(size(Tau));

for f = 1:filas %LOS 10.^(Prx/10)
    if T.RXnumber(f) == 1
        if T.Status(f) == "LOS"
            PosLos(f) = 10.^(Prx(f)/10);
        end
    end
end

PosRefDif = zeros(size(Tau));
for g = 1:filas %Reflexion-Difraccion
    if T.RXnumber(g) == 1
        if T.Status(g) == "REFDIF"
            PosRefDif(g) = 10.^(Prx(g)/10);
        end
    end
end

PosRefTx = zeros(size(Tau));

for h = 1:filas %Reflexion-Transmision
    if T.RXnumber(h) == 1
        if T.Status(h) == "REFTX"
            PosRefTx(h) = 10.^(Prx(h)/10);
        end
    end
end

distZero = ones(size(time2)); % Vector de ceros del tamaño del tiempo
distZero = 10^(-20)*distZero; %mW
distZero(round(Tau(:)/time2(2))) = Prx_lin(:);
distZero2 = 10*log10(distZero); % Suma de todas las sincs

%LOS
```




```
distZero_LOS = ones(size(time2));
distZero_LOS = 10^(-20)*distZero_LOS;
distZero_LOS(round(Tau(:)/time2(2))) = PosLos(:);
distZero2_LOS = 10*log10(distZero_LOS);

%REF
distZero_REF = ones(size(time2));
distZero_REF = 10^(-20)*distZero_REF;
distZero_REF(round(Tau(:)/time2(2))) = PosRef(:);
distZero2_REF = 10*log10(distZero_REF);

%DIF
distZero_DIF = ones(size(time2));
distZero_DIF = 10^(-20)*distZero_DIF;
distZero_DIF(round(Tau(:)/time2(2))) = PosDif(:);
distZero2_DIF = 10*log10(distZero_DIF);

%REFDIF
distZero_REFDIF = ones(size(time2));
distZero_REFDIF = 10^(-20)*distZero_REFDIF;
distZero_REFDIF(round(Tau(:)/time2(2))) = PosRefDif(:);
distZero2_REFDIF = 10*log10(distZero_REFDIF);

%REFTX
distZero_REFTX = ones(size(time2));
distZero_REFTX = 10^(-20)*distZero_REFTX;
distZero_REFTX(round(Tau(:)/time2(2))) = PosRefTx(:);
distZero2_REFTX = 10*log10(distZero_REFTX);
```

ANEXO 2. PDP DEL RESTO DE POSICIONES

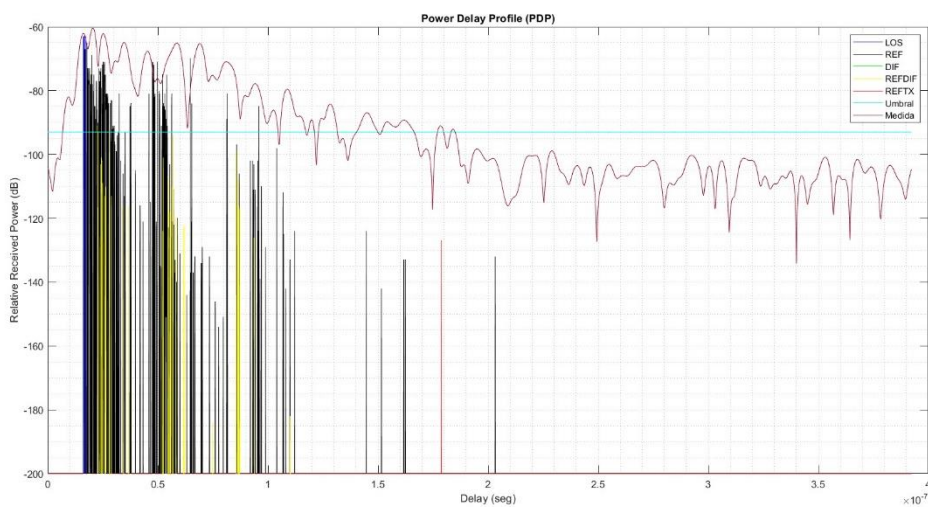


Figura 30. Comparativa medida y simulación posición 3

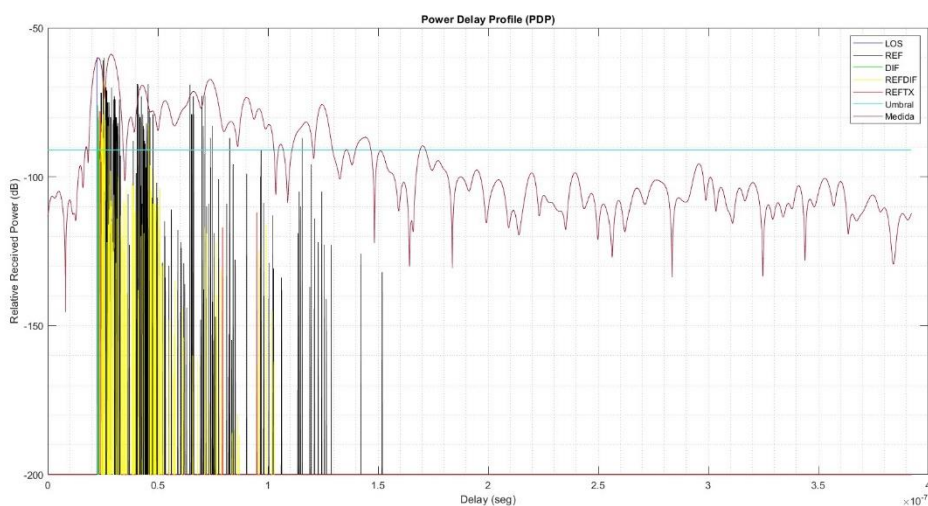


Figura 31. Comparativa medida y simulación posición 5

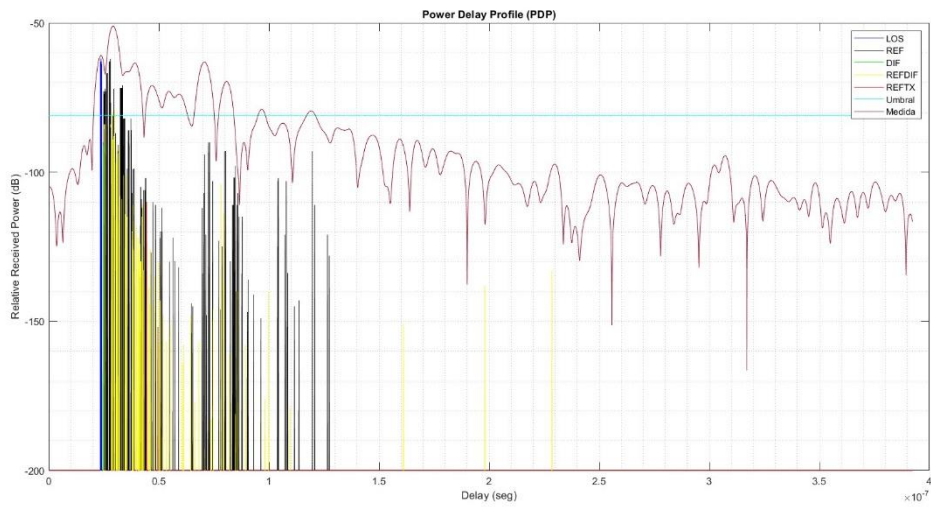


Figura 32. Comparativa medida y simulación posición 7

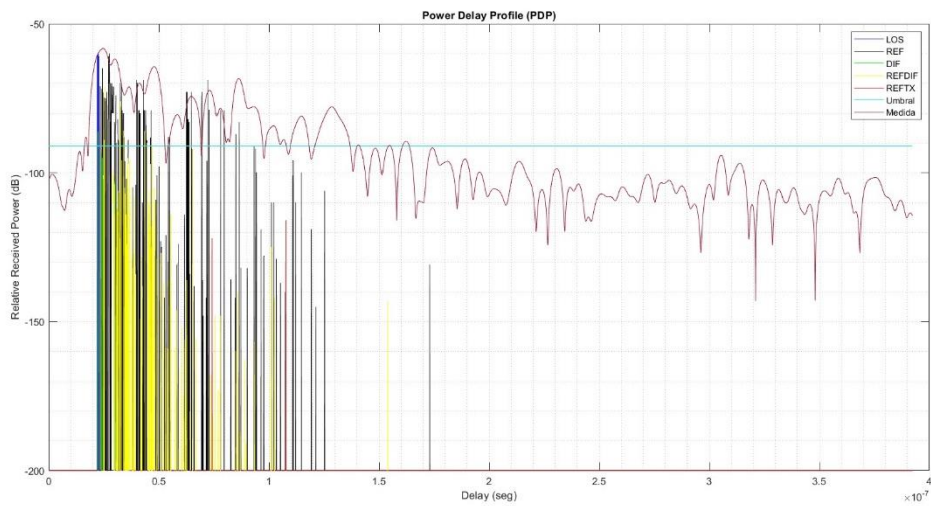


Figura 33. Comparativa medida y simulación posición 9