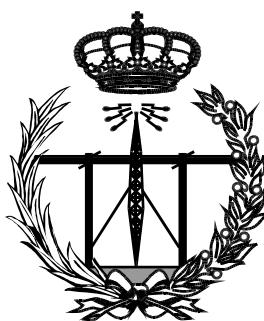


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



*Trabajo Fin de Grado*

**MEDIDA DEL CANAL RADIO EN  
INTERIORES PARA COMUNICACIONES 5G**  
(Measurement of the indoor radio channel for  
5G communications)

Para acceder al Título de

*Graduado en  
Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación*

Autor: José Bengoechea Cuadrado

Septiembre - 2018

**GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE  
TELECOMUNICACIÓN**

**CALIFICACIÓN DEL TRABAJO FIN DE GRADO**

**Realizado por:** José Bengoechea Cuadrado

**Director del TFG:** Jesús Ramón Pérez López

**Título:** “Medida del canal radio en interiores para comunicaciones 5G”

**Title:** “Measurement of the indoor radio channel for 5G communications “

**Presentado a examen el día:**

para acceder al Título de

**GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE  
TELECOMUNICACIÓN**

**Composición del Tribunal:**

Presidente (Apellidos, Nombre): Torres Jiménez, Rafael Pedro

Secretario (Apellidos, Nombre): Pérez López, Jesús Ramón

Vocal (Apellidos, Nombre): Lomer Barboza, Mauro

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de: .....

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

Fdo.: El Director del TFG

Vº Bº del Subdirector

Trabajo Fin de Grado Nº



## **Agradecimientos**

*Al director de mi trabajo, Jesús R. Pérez, por su paciencia, dedicación, y ayuda que ha hecho que sea posible este proyecto.*

*Al profesor Rafael P. Torres por el tiempo dedicado y todos sus consejos.*

*A mi compañero Jorge por su disposición a echarme una mano siempre que lo he necesitado.*

*A mis padres y abuelos por confiar en mí y darme todo su apoyo.*

*A Ana, mi novia, por las horas de biblioteca compartidas y su cariño.*

*Muchas gracias a todos.*

# Índice

<b>Capítulo 1: Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción al 5G	1
1.2. Objetivos y estructura	4
<b>Capítulo 2: Caracterización del canal</b>	<b>5</b>
2.1. Introducción	5
2.2. Parámetros del canal radio	6
2.2.1. Pérdidas de propagación	6
2.2.2. Perfil Potencia Retardo	7
<b>Capítulo 3: Medidas y simulación del canal radio</b>	<b>10</b>
3.1. Introducción	10
3.2 Sistema de medida	11
3.2.1. Arquitectura	11
3.2.2. Aplicación de control	14
3.3. CINDOOR	25
3.3.1. Funcionamiento	25
3.4. Conclusiones	29
<b>Capítulo 4: Resultados</b>	<b>30</b>
4.1. Introducción	30
4.2. Configuración de las medidas	31
4.3. Escenario 1: Sala multiusos	33
4.3.1. Resultados ITU y conclusiones	36
4.4. Escenario 2: Laboratorio 220	43
4.4.1. Resultados ITU y conclusiones	47
<b>Capítulo 5: Conclusiones y líneas de futuras</b>	<b>54</b>
5.1. Conclusiones	54
5.2. Líneas futuras	56
<b>Capítulo 6: Referencias</b>	<b>57</b>

# **Lista de tablas**

## **Capítulo 4**

- Tabla 4.1- Posiciones relativas de la antenas transmisora y receptora y distancia entre antenas 35
- Tabla 4.2- Recomendaciones de ITU sobre las características electromagnéticas de los materiales del primer escenario 36
- Tabla 4.3- Posiciones relativas de los emplazamientos de la antena transmisora y distancia en metros con respecto a la antena receptora 46

# **Lista de figuras**

## **Capítulo 1**

- Figura 1.1- Escenarios de uso de las nuevas tecnologías IMT (International Mobile Telecommunications) 2
- Figura 1.2- Mejoras clave para dar el salto desde IMT-Advanced a IMT-2020 3

## **Capítulo 2**

- Figura 2.1- Ejemplo del PDP de un canal indoor 7
- Figura 2.2- PDP de un canal donde las contribuciones se consideran por encima de un ruido de fondo, NF 8

## **Capítulo 3**

- Figura 3.1- Diagrama de bloques del sistema de medida 11
- Figura 3.2- Sistema de medida 12
- Figura 3.3- Curva de ganancia de la antena transmisora EM-6865-600347 13
- Figura 3.4- Curva de ganancia de la antena receptora EM-6865-600400 13
- Figura 3.5- Ventana del menú de inicio de la aplicación 15
- Figura 3.6- Ventana de configuración del barrido plano 16
- Figura 3.7- Ventana de configuración del analizador 17
- Figura 3.8- Ventana del programa “Cargar y visualizar medida” 18
- Figura 3.9- Diálogo de acondicionamiento en el que se selecciona el tipo de parámetro 19
- Figura 3.10- Diálogo de acondicionamiento de una medida 19

• Figura 3.11- Diálogo de acondicionamiento con el parámetro Pérdidas de canal seleccionado	20
• Figura 3.12- Formato de los ficheros de ganancia de las antenas	20
• Figura 3.13- Panel de representación gráfica	21
• Figura 3.14- Salida gráfica con la opción Plano 2D	21
• Figura 3.15- Salida gráfica con la opción 3D	22
• Figura 3.16- Salida gráfica con la opción Cortes seleccionada	22
• Figura 3.17- Panel de representación gráfica mediante corte sobre un eje	23
• Figura 3.18- Matriz tridimensional con datos de las medidas	24
• Figura 3.19- Ventana de configuración de puertos	24
• Figura 3.20- Interfaz gráfica de CINDOOR	26
• Figura 3.21- Interfaz gráfica de los datos de entrada de CINDOOR	26
• Figura 3.22- Distribución de rayos de un canal radio en un escenario interior	27
• Figura 3.23- Interfaz gráfica de configuración del transmisor en CINDOOR	28
• Figura 3.24- Interfaz gráfica de configuración del receptor en CINDOOR	28

#### **Capítulo 4**

• Figura 4.1- Posiciones de los puntos de medida sobre el barrido plano	31
• Figura 4.2- Detalle de la posición de la antena receptora en la campaña de medidas	33
• Figura 4.3- Fotos de la sala multiusos en la campaña de medida	34
• Figura 4.4- Plano del escenario 1 (sala multiusos y zona colindante) con posiciones del receptor y transmisores	35
• Figura 4.5- Modelo geométrico/electromagnético de CINDOOR empleado en las simulaciones en el entorno de la sala multiusos	36

- Figura 4.6- Interfaz gráfica del programa de Matlab que extrae algunos parámetros del PDP y pérdidas de propagación de las simulaciones y medidas 37
- Figura 4.7- PDP promedio normalizado de las medidas y simulaciones en el primer escenario 38
- Figura 4.8- RMS Delay Spread de las medidas y simulaciones en el primer escenario 39
- Figura 4.9- Ancho de banda de coherencia de las medidas y simulaciones en el primer escenario 41
- Figura 4.10- Path Loss de medidas y simulaciones 42
- Figura 4.11- Laboratorio de simulación S220 44
- Figura 4.12- Otras zonas del escenario de medida 45
- Figura 4.13- Plano del escenario 2 con posiciones del receptor y transmisores 46
- Figura 4.14- Modelo geométrico/electromagnético de CINDOOR empleado en las simulaciones en el entorno del laboratorio S220 47
- Figura 4.15- PDP promedio normalizado de las medidas y simulaciones en el escenario 2 49
- Figura 4.16- RMS Delay Spread de las medidas y simulaciones del segundo escenario 50
- Figura 4.17- Ancho de banda de coherencia de las medidas y simulaciones en el segundo escenario 52
- Figura 4.18- Path Loss de las medidas y simulaciones del segundo escenario 53

## Capítulo 5

- Figura 5.1- PDP de algunas medidas y simulaciones del escenario 2 55

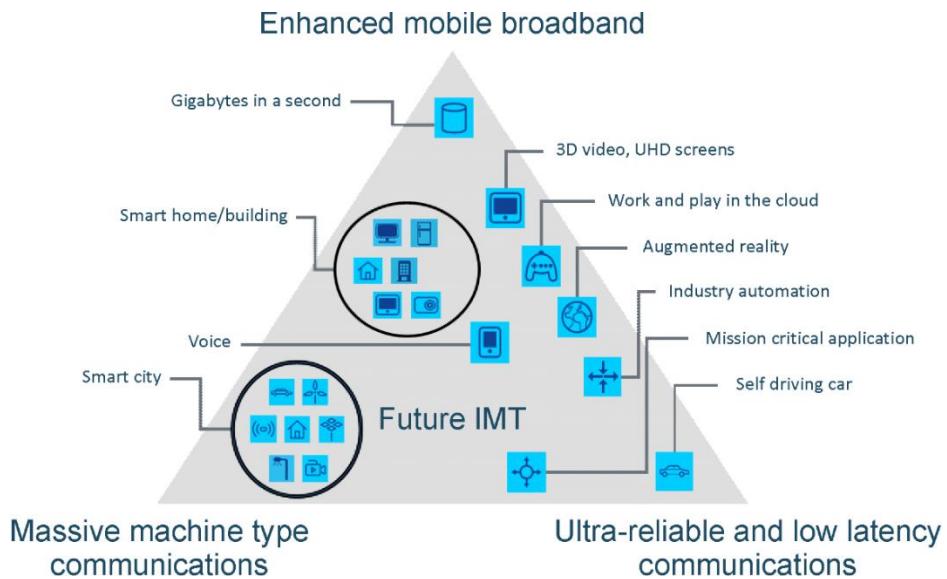


# Capítulo 1. Introducción

## 1.1 Introducción al 5G

En la última década, el número de dispositivos conectados y el volumen de datos móviles ha crecido en gran medida. Haciendo un repaso a la historia de las comunicaciones móviles, desde que se desplegaron las primeras redes digitales GSM (2G) que ofrecían una tasa de datos de 9,6 Kbits/s hasta las tasas de 1 Gbit/s de tasas de pico para LTE-Advanced que actualmente ya se están alcanzando en algunas redes, se observa que la velocidad se ha multiplicado por un factor superior a 100.000. En nuestro país, este proceso evolutivo comenzó en 1995 con el despliegue de las primeras redes 2G, pasando por los 2 Mbit/s de UMTS (3G), los 84 Mbit/s de HSPA+ (3.75G), alcanzando los 300 Mbit/s de LTE (4G). Este crecimiento continuará en los siguientes años a un ritmo mayor que el actual. Algunos informes estiman que, para el año 2020, habrá aproximadamente 50 mil millones de dispositivos móviles conectados que supondrán una tasa de tráfico de datos superior a los 25 EB (Exabytes) al mes [1]-[3], cifra que supera los límites de las tecnologías 4G. Por esta razón, se están realizando importantes esfuerzos e inversiones para desarrollar las tecnologías 5G y definir las especificaciones, con el fin de hacer frente a tal crecimiento.

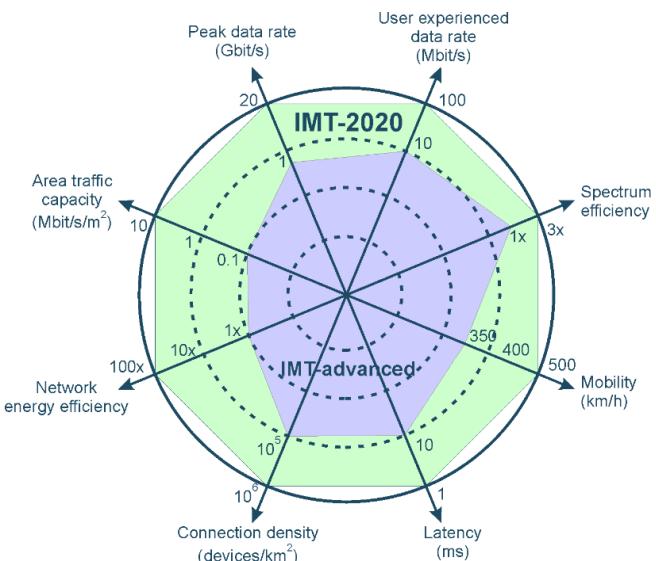
La tecnología 5G supone una oportunidad de construir nuevos modelos de negocio mediante nuevas aplicaciones y servicios. Entre estos, se plantea que el 5G integre y consiga hacer realidad el internet de las cosas (*IoT, Internet of Things*), los conceptos de hogar, tienda, oficina y ciudad inteligente, entre otros, así como aplicaciones relacionadas con la salud, las comunicaciones vehiculares (V2V) transmisiones de vídeo de alta calidad 4K-8K UH, realidad virtual y aumentada, entre otros. Un resumen gráfico de estos retos tecnológicos y de los escenarios de uso de las tecnologías bajo el paraguas de las IMT 2020 quedan expuestos en la Figura 1.1 [4].



**FIGURA 1.1 – Escenarios de uso de las nuevas tecnologías IMT (International Mobile Telecommunications).**

Para llevar a cabo tales servicios y aplicaciones con la calidad debida, los sectores industriales y académicos coinciden en que es necesario cumplir los siguientes objetivos [3],[5],[6], los cuales se resumen también de forma gráfica en la Figura 1.2 [4].

- Un aumento en la capacidad. Las velocidades de pico en las redes 5G se ha acordado que deben de multiplicar por 1000 las de 4G.
- Una mayor capacidad al borde de la celda. Se han propuesto velocidades que multiplican por 100 la velocidad mínima al borde de celda para el 95% de los usuarios. Así pues, se acuerdan velocidades superiores a 100 Mbit/s frente a 1 Mbit/s exigido en 4G.
- Mejor latencia. Ha de ser inferior a 1 ms, mientras que en las redes 4G se encuentra en 10 ms.
- En el mejor de los casos, tasas de pico del orden de decenas de Gbit/s.
- Mayor eficiencia espectral por unidad de superficie (bit/Hz/km<sup>2</sup>).
- Ahorro energético y un consumo menor que otras tecnologías inalámbricas.
- Alta movilidad en el 5G, pudiendo moverse a velocidades de 500 km/h en vez de 300 km/h del 4G.



**FIGURA 1.2 – Mejoras clave para dar el salto desde IMT-Advanced a IMT-2020.**

Por otra parte, a día de hoy se están realizando importantes esfuerzos para encontrar las bandas de frecuencias más convenientes para los futuros sistemas 5G. La banda de 700 MHz ofrece una conectividad estable y de gran alcance y en zonas con bastantes paredes, garantizando una velocidad mínima de 100 Mbit/s. De la misma forma, algunos estudios impulsan también el uso del rango de frecuencias de 3.3 a 4.2 GHz para llevar a cabo el despliegue de los nuevos sistemas [7]. Esta banda es el rango de frecuencias contiguo más largo disponible por debajo de los 6 GHz. Entre los beneficios que destacan [7], es que ofrece un equilibrio óptimo entre cobertura y capacidad, lo que impulsará a una amplia gama de aplicaciones, que incluyen realidad aumentada / realidad virtual (AR/VR), vídeo de ultra alta definición (UHD), hogar inteligente, tienda inteligente, servicios sanitarios y drones. La banda 3300-4200 MHz también proporcionará conectividad móvil "on the go" (sobre la marcha), y acceso inalámbrico fijo (FWA) para uso doméstico.

Por último, la banda de 26 GHz permite dar cobertura de menor alcance con velocidades de hasta 10 Gbit/s. Esta puede ser idónea en algunos lugares como estaciones de tren, estadios deportivos, o en fábricas con dispositivos inteligentes.

El Radio Spectrum Policy Group de la UE, asesor de alto nivel que ayuda a la UE en el desarrollo de la política del espectro radioeléctrico, ha propuesto que se subasten grandes bloques de frecuencias entre los 3.4 y 3.8 GHz, además de parte de la banda de 26 GHz. Éstas serán las bandas pioneras del 5G junto con la banda 700 MHz, que será la principal.

Este trabajo está orientado al estudio del canal radio a frecuencias de entre 3 y 4 GHz, las cuales, como se ha explicado anteriormente, se usarán en los sistemas 5G.

## 1.2 Objetivos y estructura

Los retos derivados de los requisitos exigidos a las futuras redes móviles precisan del conocimiento de las características del canal radio en aquellas bandas susceptibles de implementar los sistemas 5G. Por esta razón, el objetivo de este proyecto es estudiar y obtener conclusiones del canal radio a frecuencias entre 3 y 4 GHz en los diferentes escenarios en los que se ha medido (en el edificio de ingeniería de telecomunicación “Profesor José Luis García García”, de la Universidad de Cantabria).

Las conclusiones obtenidas son el resultado, principalmente, del análisis de las pérdidas de propagación y de algunos parámetros extraídos del perfil potencia retardo (PDP, Power Delay Profile). Para este estudio, no solo se ha contado con los datos de las campañas de medidas, sino también con los datos de las simulaciones del canal realizadas mediante la herramienta CINDOOR (herramienta software de apoyo en el análisis del canal radio para la implementación de sistemas inalámbricos).

En cuanto a la estructura de este documento, éste se divide en 5 capítulos, siguiendo el esquema que se detalla a continuación.

En el capítulo 2 se describen algunos parámetros que se usan para caracterizar el canal como las pérdidas de propagación y el perfil potencia retardo, así como algunos parámetros extraídos de éste último como la dispersión del retardo (RMS Delay Spread) o el ancho de banda de coherencia del canal.

En el capítulo 3 se describe detalladamente el sistema utilizado para obtener los datos en la campaña de medidas, así como el software CINDOOR que se emplea para realizar las simulaciones del canal.

En el capítulo 4 se describen los escenarios en los que se han realizado las medidas, se detalla la configuración del sistema en la campaña de medidas, y se incluyen los parámetros de caracterización del canal obtenidos tanto de las medidas como de las simulaciones, así como las principales conclusiones que pueden extraerse de dichos resultados.

En el capítulo 5 se presentan las conclusiones de este Trabajo Fin de Grado (TFG) y se incluyen algunas líneas futuras que pueden dar continuidad al TFG.

Para finalizar, en el capítulo 6 se aportan las referencias utilizadas en este trabajo.

# Capítulo 2. Caracterización del canal

## 2.1 Introducción

Los sistemas de comunicaciones móviles utilizan ondas de radio como soporte de la información entre extremos y, a diferencia de los medios guiados, el canal radio es un medio hostil que condiciona de forma determinante la comunicación y el funcionamiento de cualquier sistema de radiocomunicación. En cualquier entorno de exteriores (vegetación, edificios, vehículos, peatones, etc) o de interiores (puertas, tabiques, suelos y techos, mobiliario, etc) los múltiples obstáculos y dispersores que se encuentran afectan a la propagación, con el añadido de que además en el caso de las comunicaciones móviles el canal es variante en el tiempo y la disposición relativa entre transmisor y receptor también cambia con el tiempo. La propagación de ondas por el canal hace que múltiples réplicas de la señal lleguen al receptor en distintos intervalos de tiempo y con distinta fase produciéndose el fenómeno conocido como “multicamino”. Por esta razón, caracterizar el canal radio resulta de gran importancia para contribuir al óptimo desarrollo de los sistemas de comunicaciones sin hilos.

Entre otras muchas ventajas y dependiendo hacia donde se dirija la investigación, caracterizar adecuadamente el canal radio permite por ejemplo contribuir a la selección de emplazamientos óptimos para las estaciones base, lo cual supone abaratar el coste asociado a la planificación, desarrollo y dimensionamiento de una red. Además, al estudiar el efecto del canal puede decidirse sobre la importancia o necesidad de aplicar medidas que combatan el efecto del multicamino tales como la diversidad (espacial o de polarización), ecualización, o la utilización de antenas adaptativas, entre otras. Por último, se pueden analizar zonas fuertemente conflictivas e intentar aplicar una solución que se adapte al problema que presente.

En este capítulo se introduce la teoría básica relacionada con algunos de los parámetros que se utilizarán en este TFG para abordar la caracterización del canal radio en los escenarios de interiores objeto del estudio. Destacan por su importancia y dependencia con la disposición relativa transmisor-receptor parámetros tales como las pérdidas de propagación, el perfil potencia retardo, la dispersión del retardo o el ancho de banda de coherencia del canal.

## 2.2 Parámetros del canal radio

En esta sección se definen algunos de los parámetros que sirven para caracterizar el canal radio, centrando el interés en las pérdidas de propagación y el perfil potencia retardo o Power Delay Profile; así como algunos parámetros que pueden extraerse de este último, como la dispersión del retardo o RMS Delay Spread y el ancho de banda de coherencia.

### 2.2.1 Pérdidas de propagación

Las pérdidas de propagación son la reducción de densidad de potencia de una onda electromagnética cuando se propaga a través de un medio [8]. Deben considerarse a la hora de planificar un sistema de telecomunicaciones pues influyen de forma crítica en el balance del enlace. Sobre éstas influye la distancia del enlace, el entorno, así como la altura y la colocación de las antenas. Partiendo del modelo de pérdidas de propagación en el espacio libre, el valor final de las pérdidas se verá afectado por la interacción de las ondas con el entorno: difracciones, refracciones, reflexiones y absorciones, entre otros.

#### Pérdidas en el espacio libre

Aunque el espacio libre realmente implique el vacío, normalmente la propagación por la atmósfera terrestre es considerada propagación por el espacio libre. La principal diferencia es que la troposfera introduce pérdidas adicionales.

Cuando se trata de un enlace punto a punto, es preferible calcular la atenuación en el espacio libre entre antenas isótropas, denominada también pérdida básica de transmisión en el espacio libre como se muestra en la ecuación (2.1) [9],

$$Lbf = 20 \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) \text{ (dB)} \quad (2.1)$$

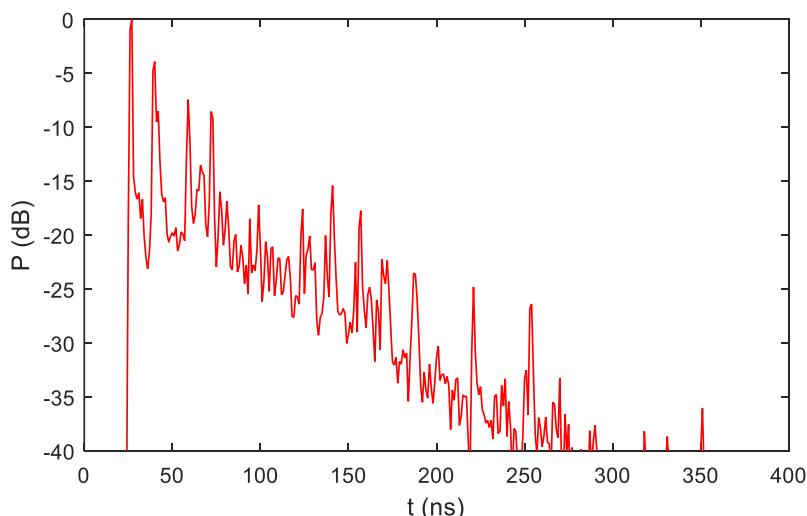
donde  $d$  es la distancia,  $\lambda$  la longitud de onda a la frecuencia de interés y  $Lbf$  son las pérdidas básicas de transmisión en condiciones de espacio libre.

## 2.2.2 Perfil potencia retardo

Mediante el perfil potencia retardo (Power Delay Profile, PDP) se permite visualizar la intensidad de las contribuciones multicamino recibidas en un entorno en función del retardo temporal de cada una. Dicho retardo es diferente para cada componente puesto que recorren distancias diferentes. Relacionando los retardos temporales con la velocidad de la luz, también es posible visualizar el PDP en función de la distancia.

Analizando el PDP, se puede extraer fácilmente la potencia recibida de la máxima contribución, es decir, del rayo directo en la mayoría de las situaciones. De la misma forma, se puede calcular la distancia entre antenas, analizar en un rango temporal fluctuaciones del rayo directo e identificar posibles cambios en las condiciones del canal, entre otras cosas. En la Figura 2.1 se observa un ejemplo del PDP de un escenario indoor.

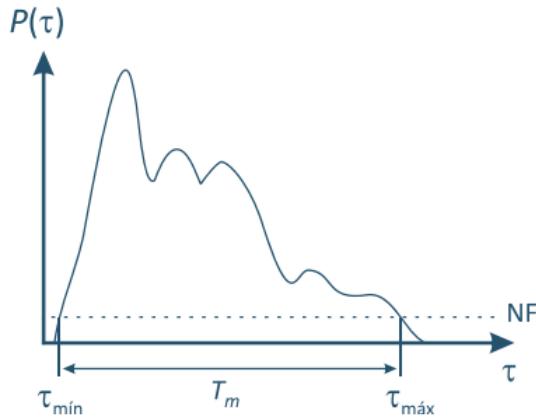
Otros parámetros que se pueden extraer del PDP son el RMS Delay Spread y el ancho de banda de coherencia del canal, vistos en el dominio del tiempo y de la frecuencia, respectivamente. En la sección siguiente se detallan ambos parámetros.



**FIGURA 2.1** –Ejemplo del PDP de un canal indoor.

## Dispersión del retardo

El RMS Delay Spread, o dispersión del retardo, es una medida que permite caracterizar las contribuciones multicamino en el dominio del tiempo. Se interpreta como la diferencia de tiempo entre la llegada de la primera contribución al receptor (generalmente, la del rayo directo) y la última componente significativa. En la Figura 2.2, se observa una gráfica aclarativa.



**FIGURA 2.2 – PDP de un canal donde las contribuciones se consideran por encima de un ruido de fondo, NF.**

El Delay Spread puede ser calculado de diferentes formas, siendo la más significativa la RMS (Root Mean Square) delay spread. Ésta se obtiene a partir del PDP y del exceso de retardo medio del canal.

Tomando como referencia la Figura 2.2, se calcula el RMS Delay Spread mediante las ecuaciones (2.2)-(2.3),

$$\bar{\tau} = \frac{\int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} \tau P(\tau) d\tau}{\int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} P(\tau) d\tau} \quad (2.2)$$

$$\tau_{rms} = \sqrt{\bar{\tau}^2 - (\bar{\tau})^2} \quad (2.3)$$

donde  $\bar{\tau}$  es el retardo medio y  $\tau_{rms}$  es el retardo cuadrático medio, o RMS Delay Spread.

La importancia del RMS delay spread se debe a que permite tener una idea de cómo afecta la interferencia entre símbolo (ISI) a la comunicación. Para evitar el ISI en un canal, la duración del símbolo en la comunicación ha de ser lo suficientemente grande en comparación con el Delay Spread (unas diez veces más es suficiente).

## Ancho de banda de coherencia (Bc)

Un parámetro similar al Delay Spread empleado para caracterizar el canal es el ancho de banda de coherencia. Éste se obtiene en el dominio de la frecuencia. Es una medida estadística del rango de frecuencias en las que el canal afecta por igual a todas las componentes espectrales, es decir, con la misma atenuación y fase.

El ancho de banda de coherencia, visto de otra forma, es el rango de frecuencias en las que dos componentes frecuenciales tienen un gran potencial para correlarse en amplitud. Esto permite poder definir diferentes anchos de banda de coherencia en función del coeficiente de correlación entre las amplitudes a distinta frecuencia. Se suele considerar para valores de correlación de 0.9, 0.7 ó 0.5 (90, 70 o 50%).

Los anchos de banda de coherencia para los valores de correlación 0.5, 0.7 y 0.9 se pueden aproximar habiendo sido obtenido el RMS delay spread según las ecuaciones (2.4-2.6).

$$Bc^{50\%} = \frac{1}{2\pi\tau_{rms}} \quad (2.4)$$

$$Bc^{70\%} = \frac{1}{4.49 \tau_{rms}} \quad (2.5)$$

$$Bc^{90\%} = \frac{1}{16.9 \tau_{rms}} \quad (2.6)$$

donde  $Bc$  representa el ancho de banda de coherencia para los diferentes porcentajes de correlación del canal y  $\tau_{rms}$  es el retardo cuadrático medio.

Se puede observar que, cuanto mayor sea el valor de correlación, menor es el ancho de banda de coherencia puesto que, evidentemente, el rango de frecuencias en el que el canal tiene un comportamiento plano es menor.

# Capítulo 3. Medida y simulación del canal radio

## 3.1 Introducción

En este capítulo se describe de manera detallada el sistema de medida utilizado en este trabajo. Aunque en un principio se utilizó este sistema para medidas de campo lejano y cercano dentro de una cámara *anechoica*, en este trabajo se ha empleado para realizar medidas de canal LOS y NLOS a frecuencias de entre 3 y 4 GHz. Este sistema se compone de dos partes, una de ellas es la parte física (hardware) compuesta por un posicionador con dos controladores que mueven, a partir de un motor y un reductor, dos ejes (vertical y horizontal) de sendas unidades lineales. La segunda parte es la aplicación de control que regula el movimiento del sistema y procesa las medidas. Esta aplicación ha sido parcialmente modificada en este trabajo respecto al software original. En la sección 3.2.2 de este capítulo se detallan dichas modificaciones, así como su funcionamiento.

De la misma forma, en este capítulo se hace una breve descripción de la aplicación CINDOOR, una herramienta de simulación del canal radio que sirve como apoyo en la planificación de sistemas inalámbricos en espacios cerrados. Dicha aplicación ha sido utilizada con el fin de analizar el comportamiento del canal en diferentes escenarios de interior, obteniendo estadísticos a partir del PDP (Power Delay Profile) y una estimación de las pérdidas de propagación.

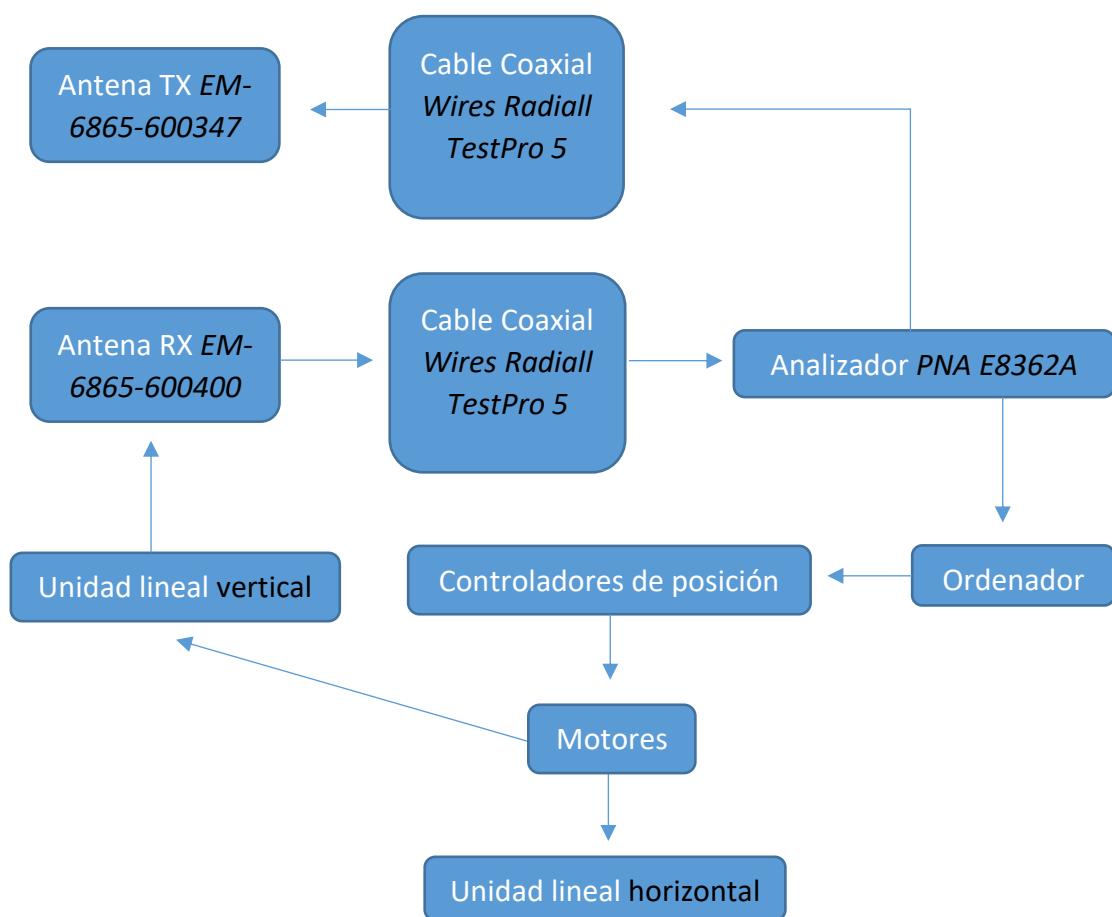
En cuanto a la estructura del capítulo, en la siguiente sección se detalla el sistema de medida, tanto su arquitectura como su aplicación de control, así como las modificaciones realizadas. En la segunda parte se explica la aplicación CINDOOR y en la tercera se hace una conclusión general del sistema de medida y simulación.

## 3.2 Sistema de medida

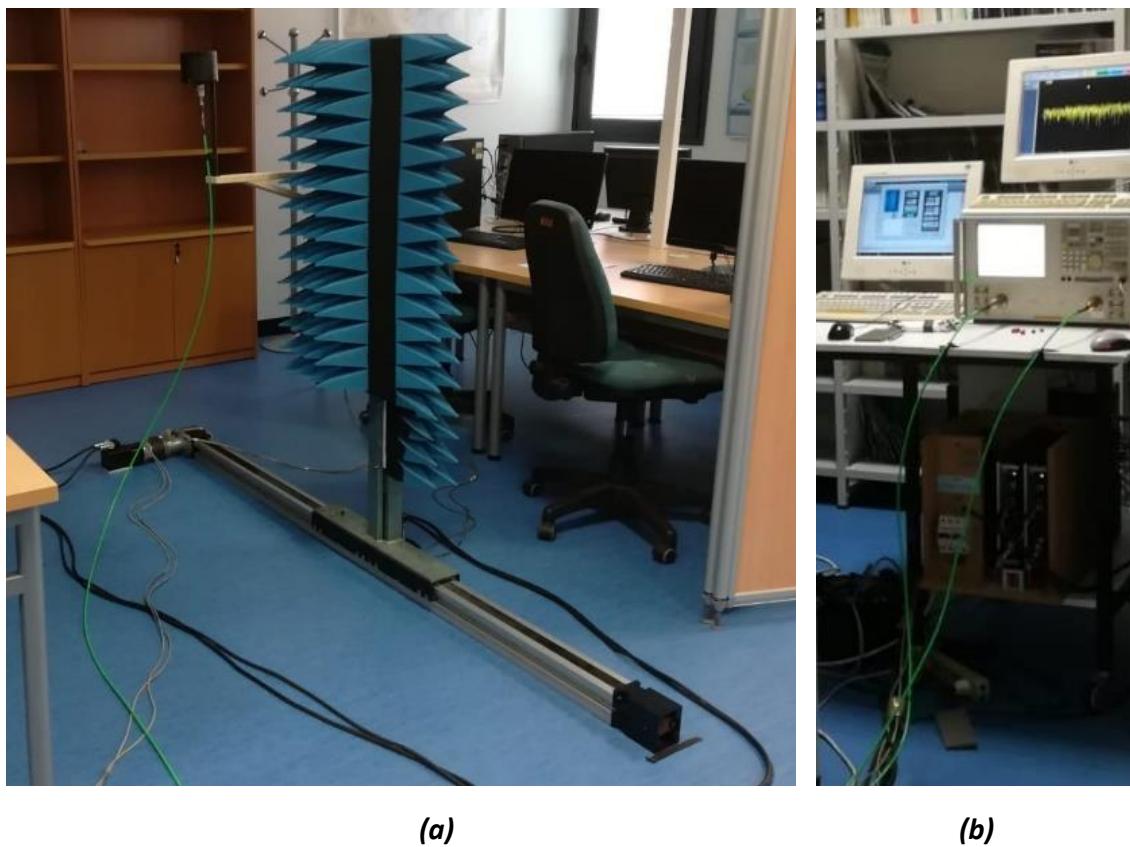
En esta sección se detalla la arquitectura del sistema de medida y la aplicación de control, así como todas las modificaciones realizadas en el software con el fin de adecuarlo a este trabajo.

### 3.2.1 Arquitectura

La arquitectura del sistema de medida se resume en el diagrama de bloques mostrado en la Figura 3.1. En la Figura 3.2 se aportan imágenes de los componentes que lo constituyen, y en los apartados siguientes se describe cada componente.



**FIGURA 3.1 – Diagrama de bloques del sistema de medida.**



**FIGURA 3.2 – Sistema de medida. (a) Unidades lineales, motores y antena receptora. (b) Analizador y posicionadores.**

## Posicionadores

El controlador de posición es el encargado de controlar el movimiento de las dos unidades lineales (Un controlador por cada unidad). Este posicionador se controla a través de un puerto serie RS232 y está conectado a un ordenador.

De manera complementaria a los posicionadores se dispone de dos interruptores magnetotérmicos, los cuales permiten su alimentación, así como activar o desactivar el envío de comandos y recibir respuestas. Sin embargo, para mover las unidades lineales han de activarse los interruptores ENABLE y RUN, también complementarios a los controladores, que activan el motor.

## Sistema de movimiento lineal

Para realizar el movimiento de la antena receptora sobre los ejes se han utilizado dos unidades lineales. Éstas se disponen una sobre la otra de forma que para un desplazamiento horizontal de la antena se obtiene un alcance de 1380 mm, mientras que para un desplazamiento vertical el alcance es de 810 mm.

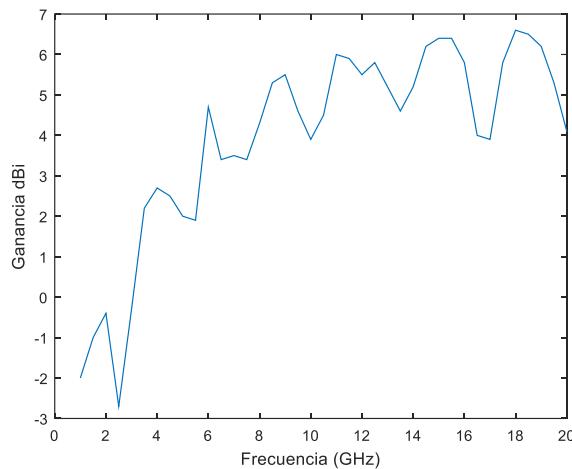
En los extremos de las unidades lineales están colocados dos interruptores de fin de carrera con el fin de evitar que los ejes sobrepasen el límite establecido.

## Antenas

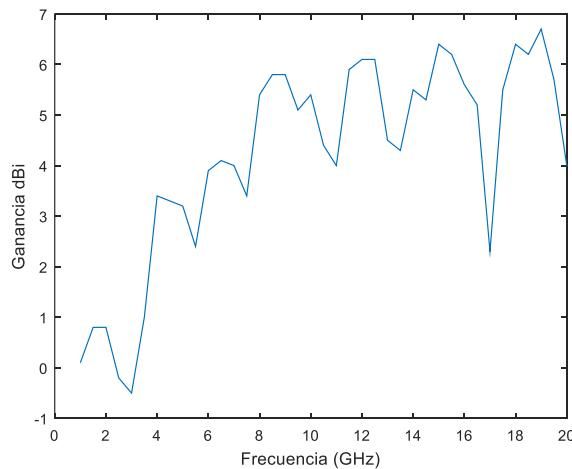
En las campañas de medida se han utilizado dos antenas omnidireccionales bicónicas de banda ancha modelo EM-6865. En transmisión se ha utilizado el nº de modelo 600347, y en recepción el 600400.

En cuanto a la arquitectura, cada antena se compone de dos elementos bicónicos conectados punto a punto.

En las Figuras 3.3 y 3.4 se muestran las curvas de ganancia de cada antena en función de la frecuencia, realizadas tomando como referencia los datos facilitados por el fabricante [2].



**FIGURA 3.3 – Curva de ganancia de la antena transmisora EM-6865-600347.**



**FIGURA 3.4 – Curva de ganancia de la antena receptora EM-6865-600400.**

## Cables coaxiales

Para conectar las antenas con el analizador se han usado tres cables coaxiales *Wires Radiall Test Pro 5*. El primero, de 10 metros de largo, conecta la antena transmisora con el analizador, mientras que los otros dos de 5 y 10 metros, respectivamente, se conectan con la receptora.

## Analizador de redes

El analizador de redes usado en el sistema de medida es el modelo *PNA E8362A* de *Agilent Technologies* [4] el cual se comunica con el ordenador mediante un puerto GPIB.

## Motores

El movimiento de las unidades lineales se realiza mediante dos motores. Cada uno de ellos es controlado por un posicionador.

### 3.2.2 Aplicación de control

Para controlar el sistema de medida, así como procesar los datos obtenidos se ha empleado como base el software SIMBA, desarrollado en otro Trabajo de Fin de Carrera [5]. A éste, se le han modificado ciertos aspectos, tanto estéticos como funcionales, con el objetivo de adecuarlo al uso específico que se le da en este trabajo.

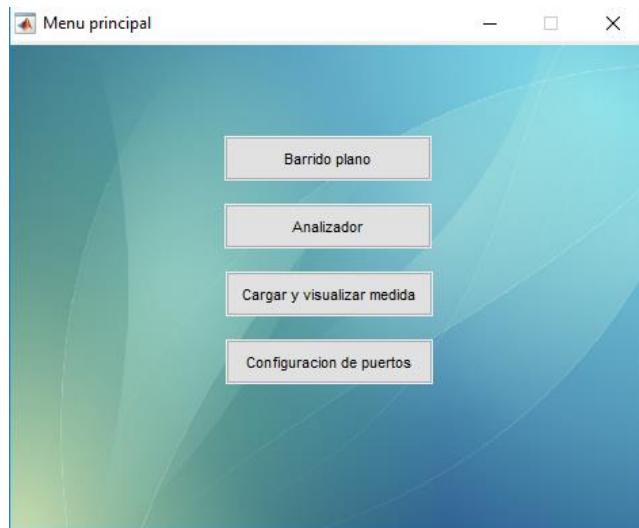
El software SIMBA ha sido diseñado en Matlab y, mediante su entorno gráfico (GUIDE), se han creado las diferentes ventanas desde las que se controla el sistema de medida y se procesan los datos.

Cada programa de la aplicación se compone de dos archivos con el mismo nombre y extensión diferente. Uno de ellos contiene el código a ejecutar (extensión *.m*), y el otro forma el entorno gráfico del mismo (extensión *.fig*). En esta sección se detallará el funcionamiento del software así como las modificaciones realizadas en éste.

## Inicio de la aplicación

En la Figura 3.5 se muestra la pantalla de inicio de la aplicación con acceso a las diferentes opciones de medida y representación de resultados:

- **Barrido plano:** permite configurar el analizador y los parámetros del barrido en los ejes X e Y para tomar las medidas pertinentes.
- **Analizador:** permite configurar el equipo de medida.
- **Cargar y visualizar medidas:** permite procesar las medidas y visualizar el parámetro S21, la potencia recibida o las pérdidas de canal.
- **Configuración de puertos:** permite seleccionar los puertos y las direcciones para realizar la comunicación las unidades lineales y el analizador.



**FIGURA 3.5 - Ventana del menú de inicio de la aplicación.**

## Barrido plano

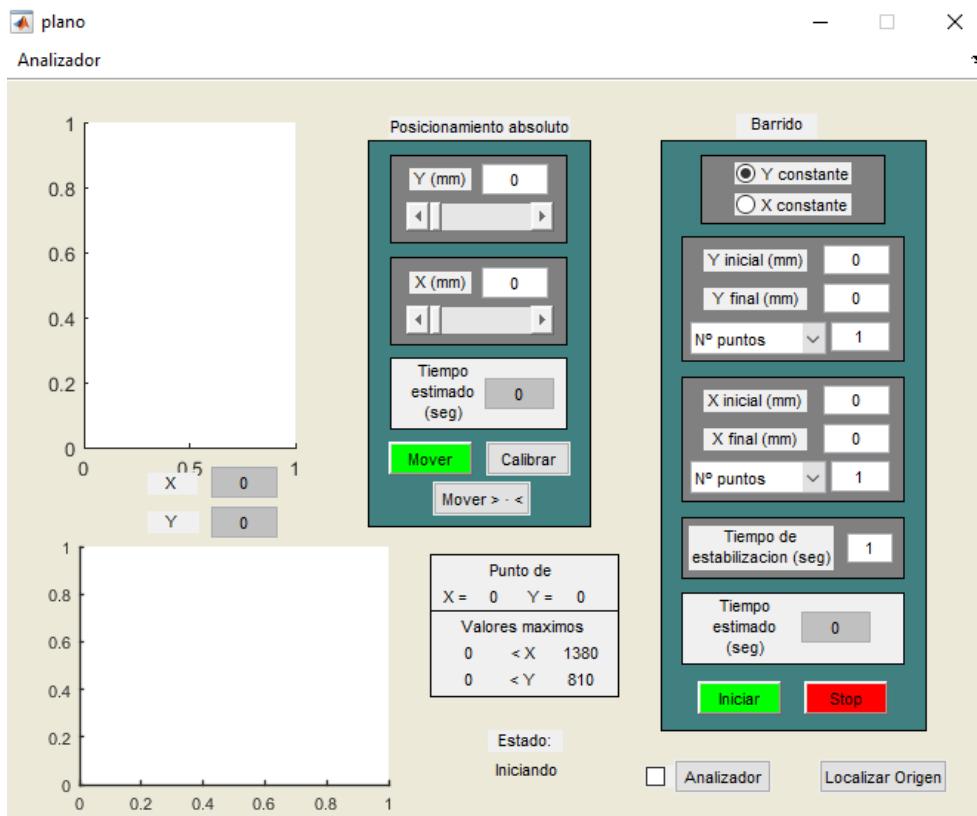
Para acceder a la configuración del movimiento de las unidades lineales realizando un barrido plano ha de seleccionarse esta opción dentro del menú principal. Desde su interfaz gráfica, vista en la Figura 3.6, se configuran diferentes aspectos:

- **Posicionamiento absoluto.** Mediante éste, se permite mover los ejes X e Y con el objeto de fijar el origen relativo de la medida mediante el botón *Calibrar*. Este punto de calibración se puede observar en el panel de visualización, así como el rango de valores que se le puede dar al barrido teniendo en cuenta en origen relativo seleccionado. De manera predeterminada, al ejecutar el programa aparece el último punto de calibración.

El tiempo estimado es orientativo y se calcula tomando como referencia una velocidad máxima de movimiento de los ejes X e Y de 5 y 1.2 mm/seg, respectivamente, así como un tiempo de aceleración/desaceleración de 4 segundos.

- **Barrido.** Éste permite configurar, respecto al origen relativo seleccionado, el movimiento del barrido en ambos ejes. También se permite seleccionar en cada eje la separación en milímetros entre muestras.

Además, la aceleración y desaceleración de los motores durante el barrido provocan vibraciones en la antena. Estas vibraciones se pueden corregir seleccionando un tiempo de estabilización antes de tomar las medidas. Se considera adecuado un tiempo de estabilización de en torno a 0.5 segundos.

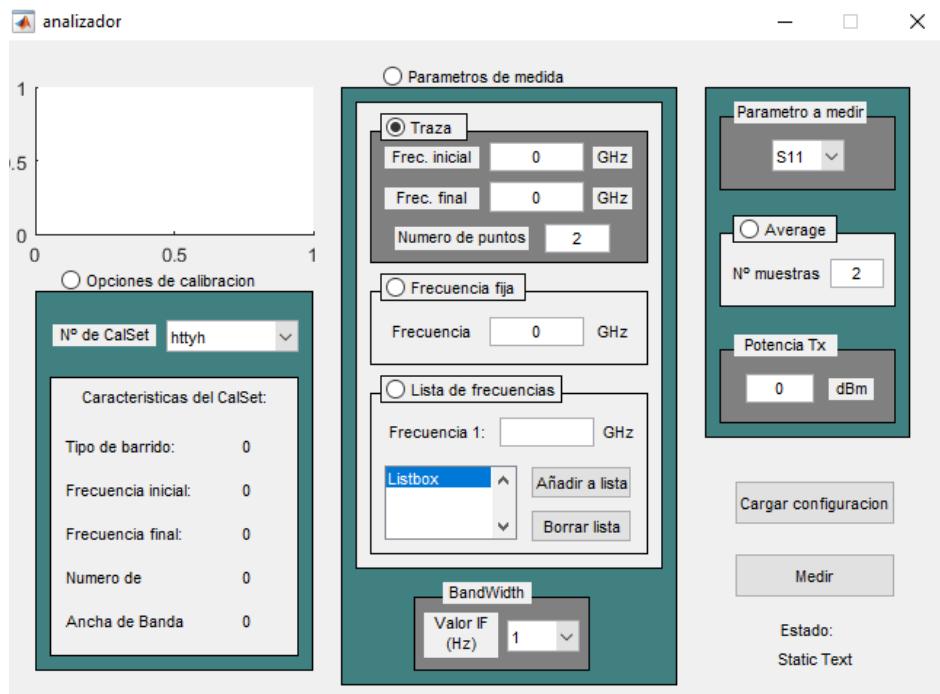


**FIGURA 3.6 - Ventana de configuración del barrido plano.**

Por último, mediante el botón *Localizar origen* el programa mueve los ejes X e Y hacia los extremos hasta pulsar los interruptores fin de carrera, detectando el rango de desplazamiento útil en cada eje.

Una vez configurado el movimiento del barrido, mediante el botón *Iniciar* se puede comenzar a realizar las medidas. En ese momento, el programa comprueba que los interruptores *ENABLE* y *RUN* están activos. Si lo están se inicia el barrido, de lo contrario, se cancelará apareciendo un mensaje de error en la pantalla.

Desde la interfaz de la Figura 3.5 también se puede acceder a la configuración del analizador pulsando *Analizador*. Este botón abrirá una ventana como la que se muestra en la Figura 3.7 y desde ésta se permite configurar el analizador para realizar las medidas pertinentes.



**FIGURA 3.7** - Ventana de configuración del analizador.

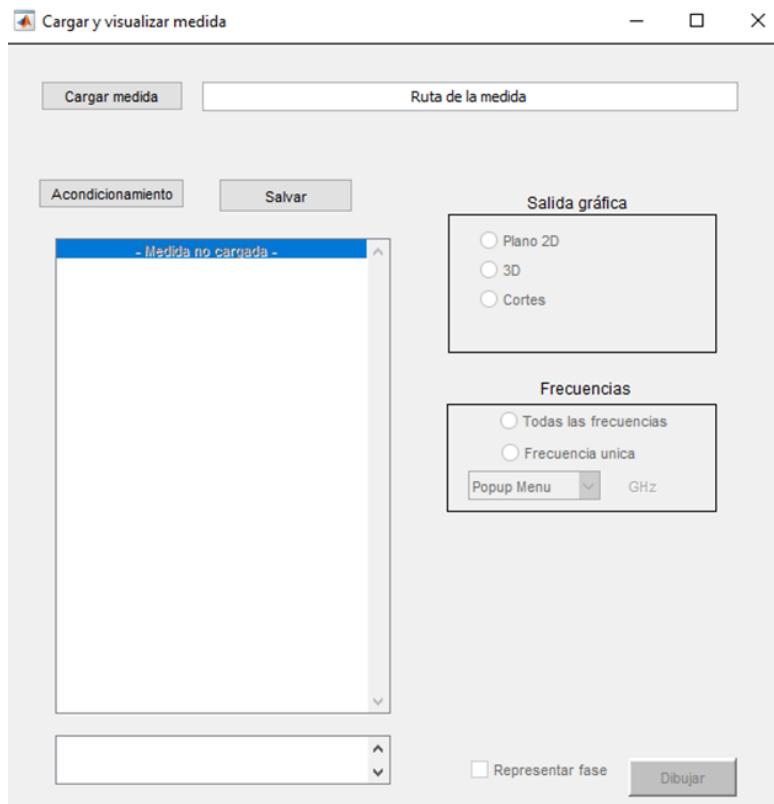
## Analizador

Se puede acceder a la configuración del analizador bien desde el menú de inicio (Figura 3.5), o bien desde el programa *Barrido plano* (Figura 3.6). Al acceder, el analizador carga todos los calsets que tiene almacenados en su memoria y se muestra la ventana de la Figura 3.13. Los parámetros de configuración pueden ser escritos por el usuario manualmente mediante la opción *Parámetros de medida* o seleccionados utilizando la opción *Opciones de calibración*.

De la misma forma, se puede seleccionar el parámetro de scattering a medir (*S11*, *S12*, *S21*, *S22*) o el número de muestras promedio para realizar la medida y la potencia de transmisión.

## Cargar y visualizar medida

A este programa se accede desde el menú de inicio de la Figura 3.5. La mayor parte de las modificaciones realizadas al software SIMBA en este trabajo se centran en este programa, por lo que en esta sección se explicará con especial detalle su uso y funcionalidad. La interfaz gráfica de dicho programa se puede ver en la Figura 3.8.

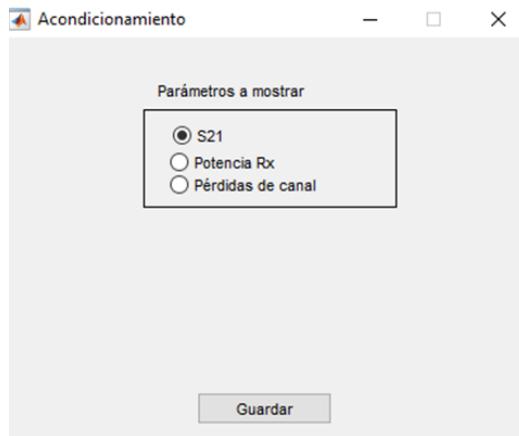


**FIGURA 3.8** - Ventana del programa “Cargar y visualizar medida”.

En este trabajo se ha realizado un importante cambio estético del programa, así como de su funcionalidad, permitiendo no solo representar mediante gráficas el S21 de la señal sino también la potencia recibida y las pérdidas de canal, entre otras cosas.

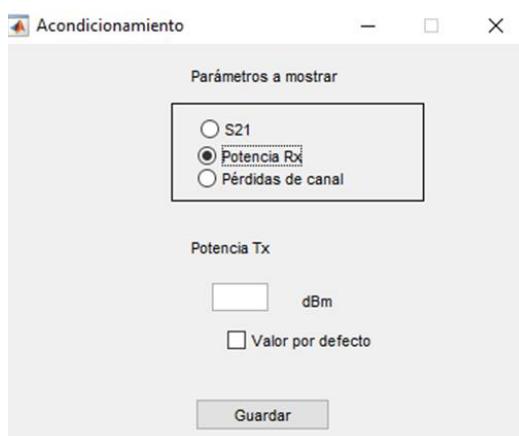
Una vez seleccionada la carpeta en donde se almacenan las medidas realizadas mediante el botón *Cargar medida*, el programa detalla las características de la medida, así como los comentarios referidos a ésta mediante un panel de visualización.

Una de las modificaciones realizadas en el programa para este trabajo permite visualizar no solo las medidas en bruto (parámetro S21), sino también la potencia recibida y las pérdidas de canal. Para ello, desde en el botón *Acondicionamiento* se accede a la ventana que se observa en la Figura 3.9 y, dentro de ésta, se puede elegir el parámetro a representar.



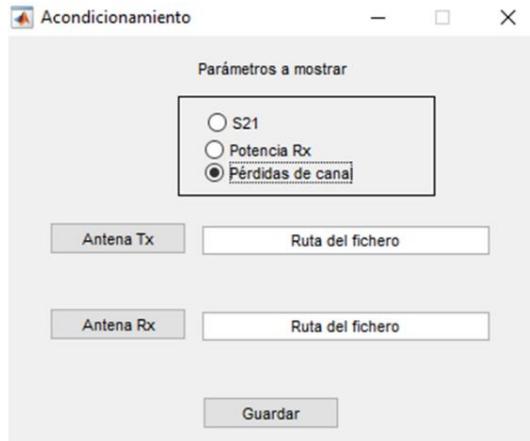
**FIGURA 3.9** - Diálogo de acondicionamiento en el que se selecciona el tipo de parámetro.

Si se desea representar la potencia recibida, el programa permite la opción de seleccionar el valor deseado de potencia transmitida (en dBm), pudiendo poner el valor real con el que se midió pulsando en *Valor por defecto*, como se puede observar en la Figura 3.10.



**FIGURA 3.10** - Diálogo de acondicionamiento de una medida.

Por último, si se desean visualizar las pérdidas de canal para esas medidas, han de indicarse las rutas de los ficheros de las antenas transmisora y receptora, como se observa en la Figura 3.11, con el fin de extraer las ganancias de dichas antenas a cada frecuencia. Los ficheros han de tener formato *.s2p* y seguir un patrón concreto como el que se muestra en la Figura 3.12.

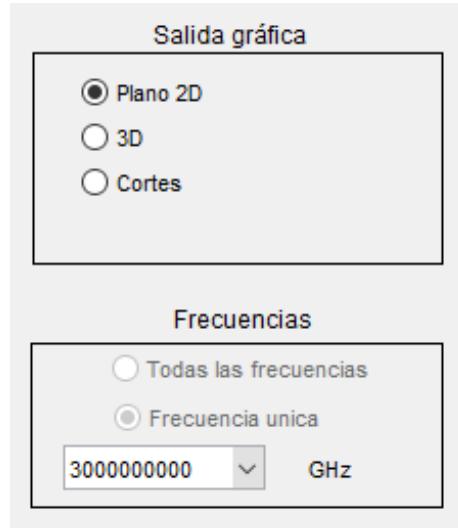


**FIGURA 3.11** - Diálogo de acondicionamiento con el parámetro Pérdidas de canal seleccionado.

%Frecuencia (MHz)	%GAIN (dBi)
1000	-2.4
1500	-1.1
2000	-0.9
2500	-3.7
3000	0.0
3500	1.6
4000	1.8
4500	2.4
5000	1.9
5500	1.6
6000	2.6
6500	1.8
7000	3.2
7500	4.8
8000	3.5
8500	4.6
9000	4.4
9500	4.4

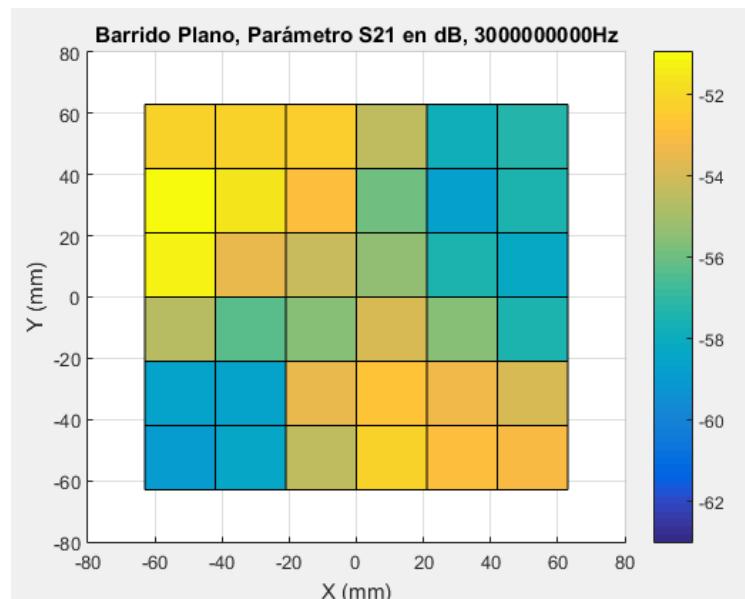
**FIGURA 3.12** – Formato de los ficheros de ganancia de las antenas.

Una vez elegido el parámetro a representar gráficamente (El S21 en caso de no seleccionarse ninguno), podemos visualizar las medidas de diferentes formas. Como vemos en la Figura 3.13, dependiendo del tipo de medidas que se hayan realizado, se las puede representar mediante gráficos 2D, 3D, o cortes.



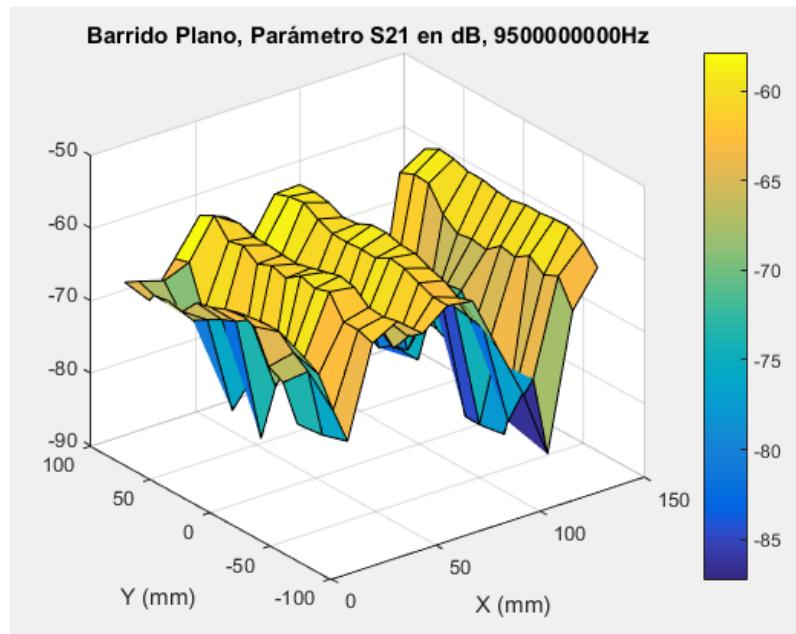
**FIGURA 3.13 - Panel de representación gráfica.**

Mediante *Plano 2D*, como observamos en la Figura 3.14, se representa en un plano el barrido espacial en función del nivel de señal del parámetro que se desea representar, y a una sola frecuencia.



**FIGURA 3.14 – Salida gráfica con la opción Plano 2D.**

Mediante la opción 3D se representa en 3 dimensiones la señal, en la cual los ejes X e Y se corresponden con los ejes reales del barrido, y el eje Z se corresponde con el parámetro a representar. Todo ello a la frecuencia seleccionada, como vemos en la Figura 3.15.



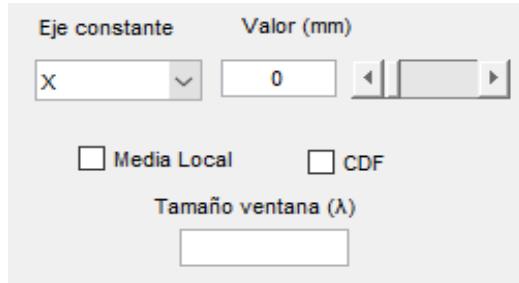
**FIGURA 3.15 - Salida gráfica con la opción 3D.**

Mediante la opción *Cortes* se permite visualizar el parámetro deseado en función de la frecuencia manteniendo uno o dos ejes del barrido constantes, como vemos en la Figura 3.16. Ésta última opción ha sido incorporada en este trabajo.



**FIGURA 3.16 - Salida gráfica con la opción Cortes seleccionada.**

En la opción *Cortes sobre un eje* se permite representar el parámetro deseado en función de la frecuencia. Además, otra de las modificaciones efectuadas en este trabajo permite representar la media local y la función de distribución acumulada (CDF, Cumulative Distribution Function), como vemos en la Figura 3.17.



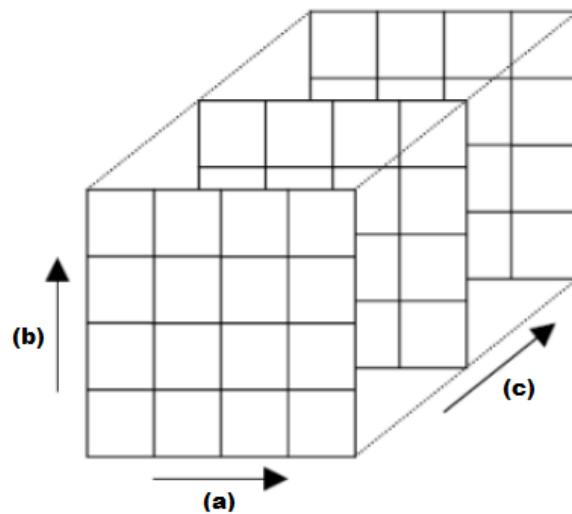
**FIGURA 3.17** - Panel de representación gráfica mediante corte sobre un eje.

Por último, se le ha añadido al programa el botón *Salvar* (visto en la Figura 3.8). Se permite seleccionar la ruta en donde se creará una carpeta *Medidas\_x* donde “x” será “S21”, “Prx”, o “Lcanal”, dependiendo del parámetro que se desea guardar. Dentro de esta carpeta se crearán dos archivos, uno con formato *.mat* y otro llamado *datos.txt*.

En el archivo *.mat* se guardará una matriz tridimensional en donde se almacenan los diferentes valores del parámetro seleccionado para los diferentes puntos y frecuencias de la medida. Es decir, los diferentes puntos del eje X e Y de esta matriz corresponden con los puntos del eje X e Y del barrido, respectivamente.

De la misma forma, en el eje Z de esta matriz se sitúan las frecuencias, de menor a mayor. En la Figura 3.18, se puede observar un esquema aclarativo.

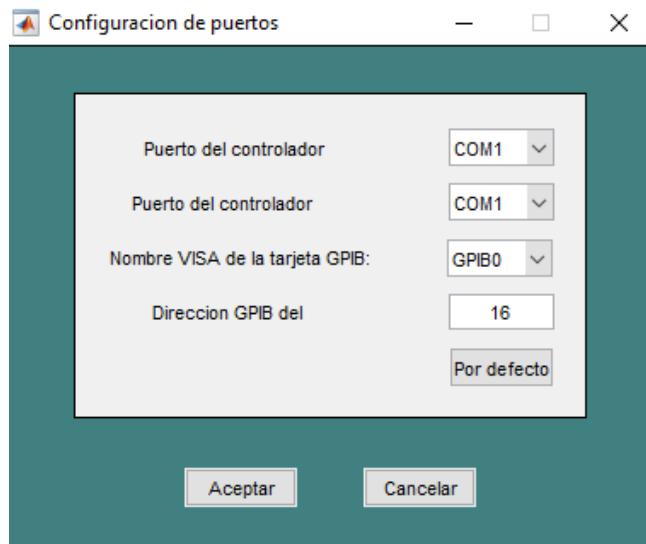
El segundo archivo, *datos.txt*, guarda información sobre las medidas como el rango de frecuencias, el paso entre ellas o la distancia entre puntos, entre otros.



**FIGURA 3.18 – Matriz tridimensional con datos de las medidas. (a) Medidas a lo largo del eje horizontal. (b) Medidas a lo largo del eje vertical. (b) Medidas en función de la frecuencia.**

### Configuración de puertos

Desde el menú inicial se puede acceder a la configuración de puertos pinchando en la misma. Como se muestra en la Figura 3.19, esta ventana permite elegir los puertos series a los que se conectan los controladores de ambos motores. Esto permite que se pueda trabajar con el programa desde otros ordenadores con diferentes configuraciones de puertos. El ordenador del laboratorio, utiliza por defecto la configuración mostrada en la Figura 3.19.



**FIGURA 3.19 - Ventana de configuración de puertos.**

## 3.3 CINDOOR

En esta sección se hace una breve introducción al programa CINDOOR, así como un resumen de su funcionamiento.

CINDOOR es una herramienta que ayuda en el diseño, planificación e implementación de sistemas inalámbricos tanto en espacios cerrados como abiertos. Ha sido desarrollada por el grupo GISAR (Grupo de Ingeniería de Sistemas, Antenas y Radiopropagación) del Departamento de Ingeniería de Comunicaciones de la Universidad de Cantabria. Su funcionamiento se basa en una implementación tridimensional completa de la teoría de rayos, la óptica geométrica (GO) y la Teoría Uniforme de la Difracción (UTD). Esta herramienta permite obtener mapas de cobertura (potencia media), estadísticas del desvanecimiento, perfiles potencia retardo y parámetros asociados como la dispersión de retardo rms y el ancho de banda de coherencia.

### 3.3.1 Funcionamiento

Como aproximación a la aplicación software, en la Figura 3.20 se muestra la interfaz principal del programa. Desde esta interfaz se selecciona el modelo geométrico del entorno. Este modelo geométrico está basado en el uso de placas planas. Esta aproximación se considera aceptable para representar los principales elementos dispersores que se encuentran en un canal radio [6].

Una vez seleccionado el modelo se sitúan las antenas transmisoras y receptoras y se simula el canal radio con el fin de obtener los diferentes parámetros de interés.

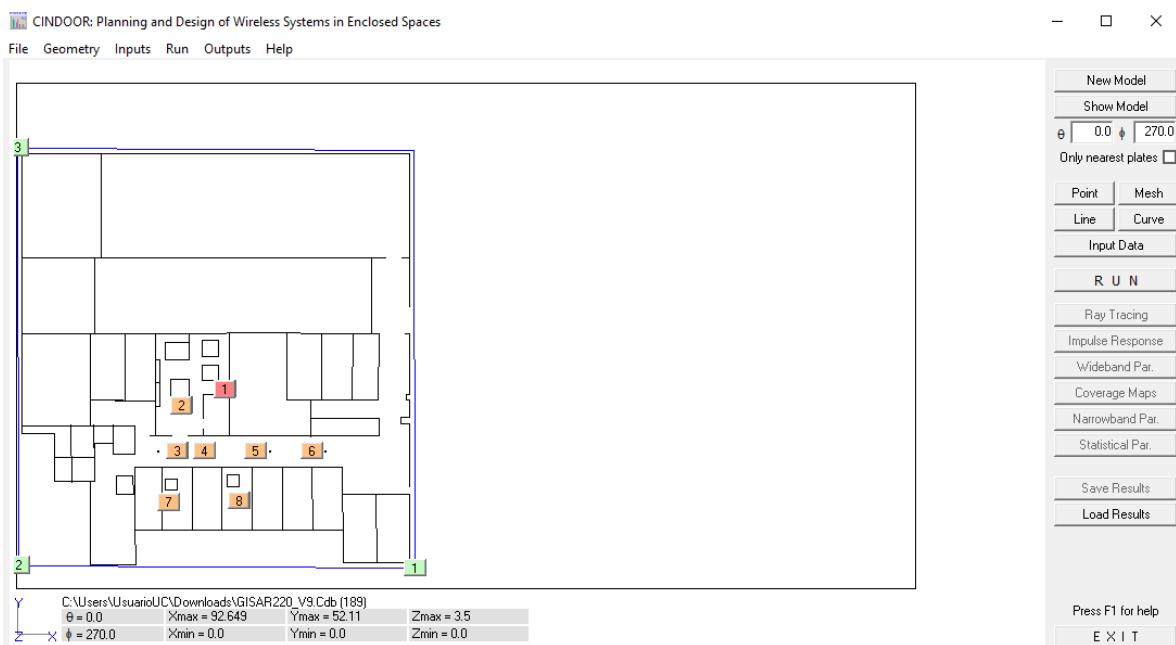


FIGURA 3.20 – Interfaz gráfica de CINDOOR.

Se puede analizar el canal radio teniendo en cuenta la combinación de diferentes mecanismos de scattering, ya sea únicamente el rayo directo o reflexiones de hasta la 10º orden, difracciones, interacciones reflexión-difracción y difracción-reflexión. En la Figura 3.21 se observa la interfaz gráfica en la que se permite seleccionar los mecanismos de acople a ser considerados.

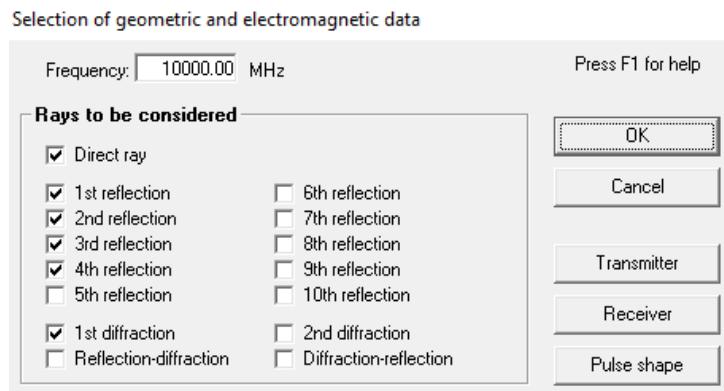
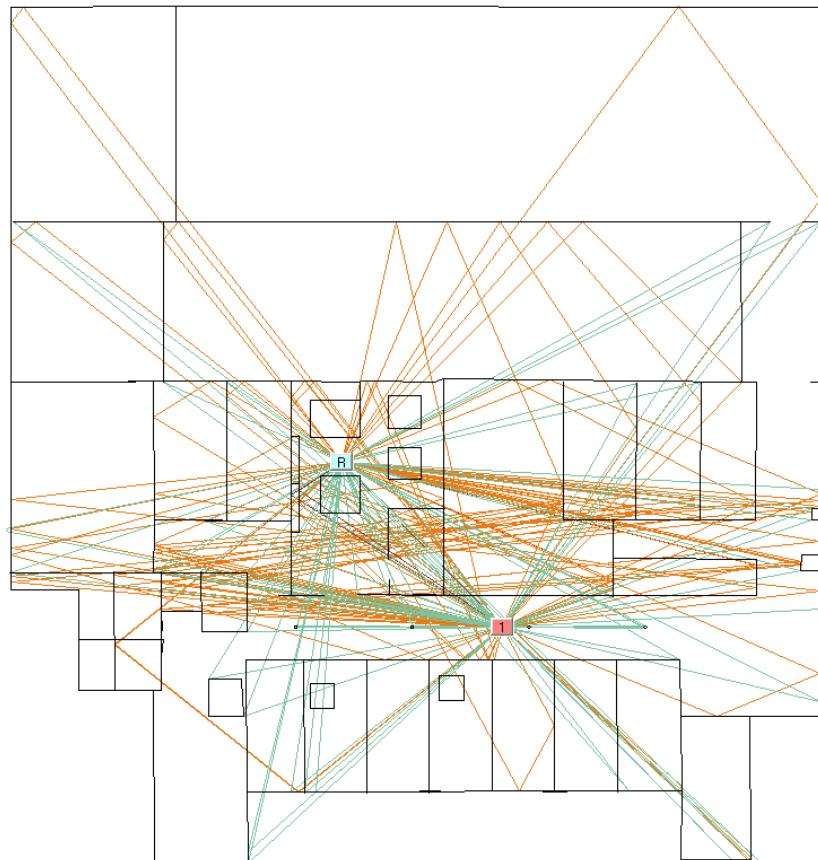


FIGURA 3.21 – Interfaz gráfica de los datos de entrada de CINDOOR.

Para el trazado de rayos, CINDOOR se basa en una combinación de la teoría de imágenes y el algoritmo BSP (Binary Space Partitioning) [6]. En la Figura 3.22 se observa un ejemplo de combinaciones de rayos para uno de los escenarios estudiados en este trabajo.



**FIGURA 3.22 – Distribución de rayos de un canal radio en un escenario interior.**

La configuración del sistema a simular se completa incluyendo los datos a considerar para los extremos transmisor y receptor (potencias, tipo de antenas, posiciones, etc), de acuerdo con las interfaces que se muestran en las Figuras 3.23 y 3.24.

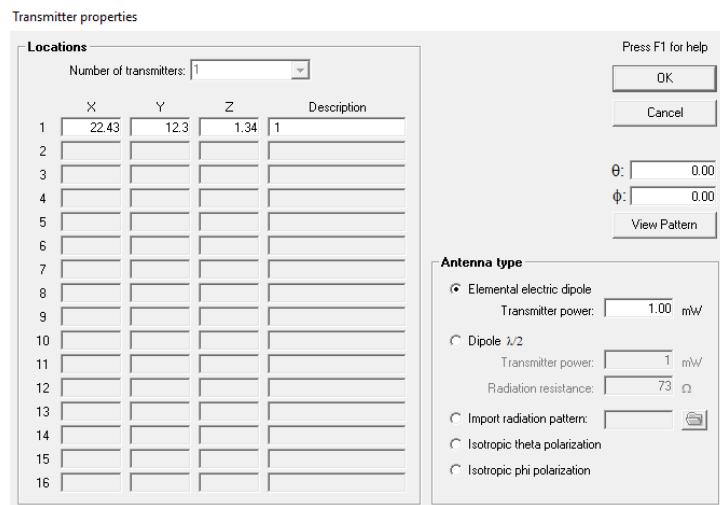


FIGURA 3.23 – Interfaz gráfica de configuración del transmisor en CINDOOR.

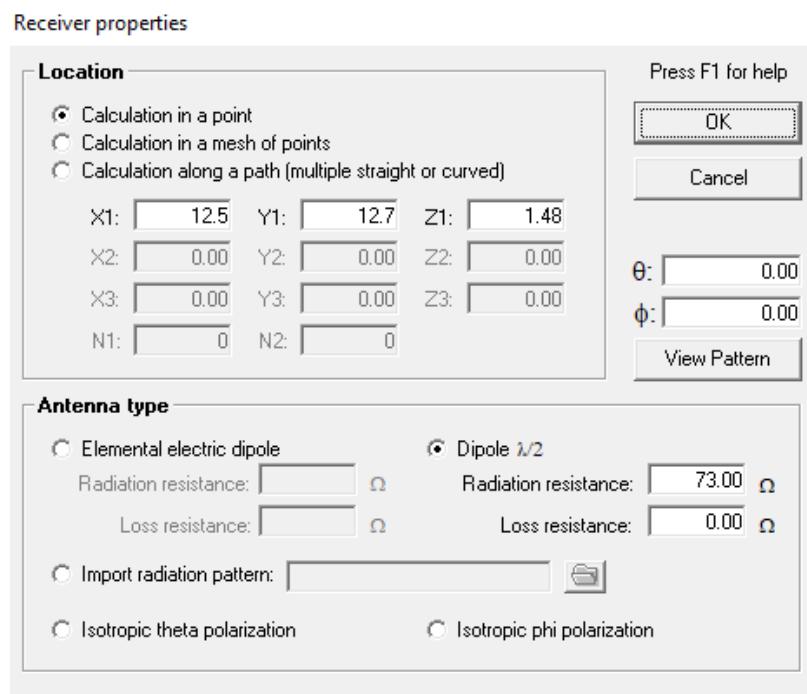


FIGURA 3.24 – Interfaz gráfica de configuración del receptor en CINDOOR.

## 3.4 Conclusiones

El objetivo de este capítulo ha sido describir el sistema utilizado para realizar medidas, así como la herramienta de simulación CINDOOR la cual ha servido de apoyo para estudiar el canal radio y llegar a una conclusión.

En un principio se utilizó el sistema para medidas de campo lejano y cercano dentro de una cámara *anechoica*. Sin embargo, en este trabajo se ha empleado para realizar medidas de canal LOS y NLOS a frecuencias de entre 3 y 4 GHz en diferentes escenarios interiores del edificio de Ingeniería de Telecomunicación de la Universidad de Cantabria, los cuales serán detallados en el siguiente capítulo, así como los resultados obtenidos. Por esta razón, y con el fin de analizar el PDP y Path Loss del canal radio, se han realizado diferentes modificaciones en el sistema de medida, concretamente en la aplicación de control. Dichas modificaciones conciernen a la forma de visualizar las medidas y exportar los datos. Además de ampliar el modo de representación gráfica, se permite exportar las medidas en un fichero .mat con el fin de compatibilizarlas con diferentes rutinas y programas, y con vistas al uso futuro que se le pueda dar.

# Capítulo 4. Resultados

## 4.1 Introducción

En este capítulo se detallan los resultados obtenidos tanto de las medidas como de las simulaciones. Estos resultados incluyen parámetros extraídos del PDP (Power Delay Profile) tales como el retardo cuadrático medio o el ancho de banda de coherencia, y una estimación de las pérdidas de propagación en banda ancha del canal, parámetros que cobrarán cierta relevancia en el estudio y despliegue del 5G.

Para obtener los resultados, se ha medido el parámetro S21 en dos escenarios de interior mediante el sistema de medida descrito en el capítulo 3. Ambos escenarios se encuentran en el Edificio Ingeniería de Telecomunicación de la Universidad de Cantabria.

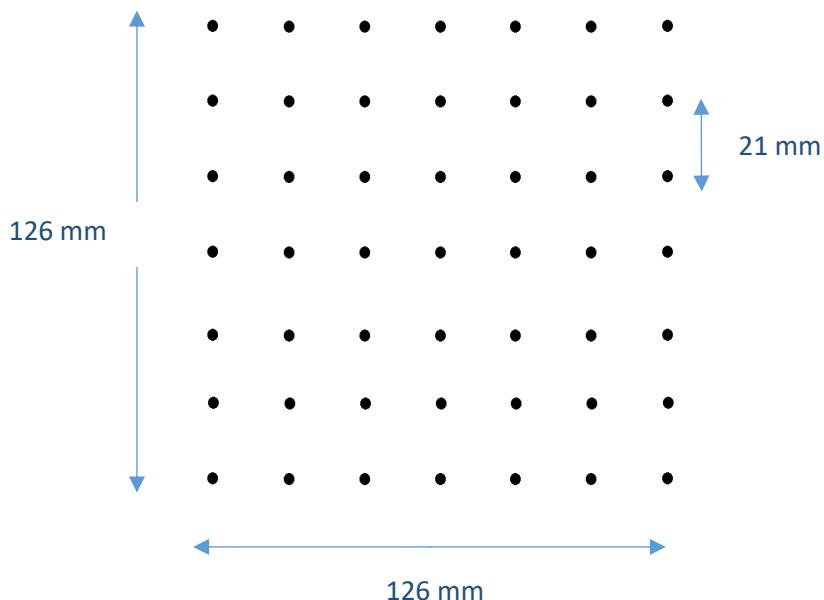
En el primer escenario se han realizado medidas con la antena transmisora en 6 posiciones diferentes de la sala multiusos, todos en situación LOS. En el segundo se han tomado en 8 posiciones diferentes, combinando situaciones LOS y NLOS.

Para contrastar los resultados obtenidos en la campaña de medida se ha empleado el software CINDOOR. A partir de modelos geométricos de facetas planas para los escenarios, incluyendo para todas las placas (paredes, suelo, techo y objetos significativos) las propiedades electromagnéticas de los diferentes materiales según recomendación de la ITU [13], se utiliza la herramienta software para simular las mismas situaciones de medida y poder contrastarlo con las medidas realizadas.

En la sección 4.2 se describe la configuración de las campañas de medida y se justifican los parámetros elegidos. En las secciones 4.3 y 4.4 se describen detalladamente los escenarios 1 y 2, y se aportan los resultados tanto de las medidas como de las simulaciones. Por último, en la sección 4.4 se incluyen conclusiones sobre los resultados obtenidos.

## 4.2 Configuración de las medidas

Las medidas se han realizado manteniendo fija la antena transmisora y desplazando la receptora mediante un barrido espacial plano sobre los ejes X e Y del escáner plano (7x7 puntos, uniformemente espaciados 21 mm en ambos ejes). En la Figura 4.1 se incluye un esquema aclarativo de la disposición espacial de los puntos del barrido para una medida. Se han tomado medidas del parámetro de scattering S21 en cada punto del barrido entre 3 y 4 GHz, con un tamaño de la traza de 801 puntos, separados 1,248 MHz en frecuencia.



**FIGURA 4.1 – Posiciones de los puntos de medida sobre el barrido plano.**

La razón por la que se ha medido un array de puntos es porque una de las estrategias de los sistemas 5G es el uso de un gran número de antenas en forma de array [7]. De la misma forma, se han realizado medidas entre 3 y 4 GHz debido a que la banda de 3,6 GHz se encuentra entre las bandas candidatas para los primeros sistemas 5G en Europa, así como en otros países.

Para la elección de determinados parámetros del barrido se han tenido en cuenta algunos conceptos teóricos como el aliasing temporal y el teorema de Nyquist, entre otros. Así pues, para la elección de la distancia entre puntos se parte del teorema de Nyquist,

$$\Delta l \leq \frac{\lambda}{2} \quad (4.1)$$

donde  $\Delta l$  es la distancia entre puntos del array, y  $\lambda$  la longitud de onda.

Calculando la longitud de onda máxima y mínima del barrido en frecuencia a realizar se obtienen valores para los límites frecuenciales y para la frecuencia central tal que  $\lambda_{\text{max}}=10$  cm (3 GHz),  $\lambda_{\text{min}}=7.5$  cm (4 GHz) y  $\lambda_0=8.57$  cm (3.5 GHz).

Con estos datos y partiendo de la ecuación (4.1), se ha decidido aplicar una separación que lleva una distancia de 126 mm entre los puntos de los extremos, que coincide con una separación de  $\frac{3\lambda_0}{2}$ , distancia que las unidades lineales del sistema de medida son capaces de desplazarse.

Para la elección del número de puntos del barrido frecuencial se ha tenido en cuenta una de las opciones que ofrece el analizador de redes: 201, 401, 801, 1601, 3201, 6401, 12801 o 16001 frecuencias diferentes.

En este sentido, partiendo de que se desea evitar el aliasing temporal se ha decidido tomar 801 puntos de frecuencia diferentes ya que, como vemos en las ecuaciones (4.2)-(4.4), son suficientes para evitarlo puesto que las medidas se han realizado en escenarios de interiores con una separación entre antenas muy inferior a los 240.3 metros obtenidos en la ecuación (4.4).

$$\Delta f = \frac{\Delta B}{N} = 1.248 \text{ MHz} \quad (4.2)$$

donde  $\Delta f$  es el incremento frecuencial,  $\Delta B$  es la diferencia entre la frecuencia máxima y mínima medida, y  $N$  es el número de frecuencias a analizar.

$$T_{\text{max}} = \frac{1}{\Delta f} = 801 \text{ ns} \quad (4.3)$$

donde  $T_{\text{max}}$  es el tiempo máximo sin aliasing.

$$D_{\text{max}} = T_{\text{max}} \cdot c = 240.3 \text{ m} \quad (4.4)$$

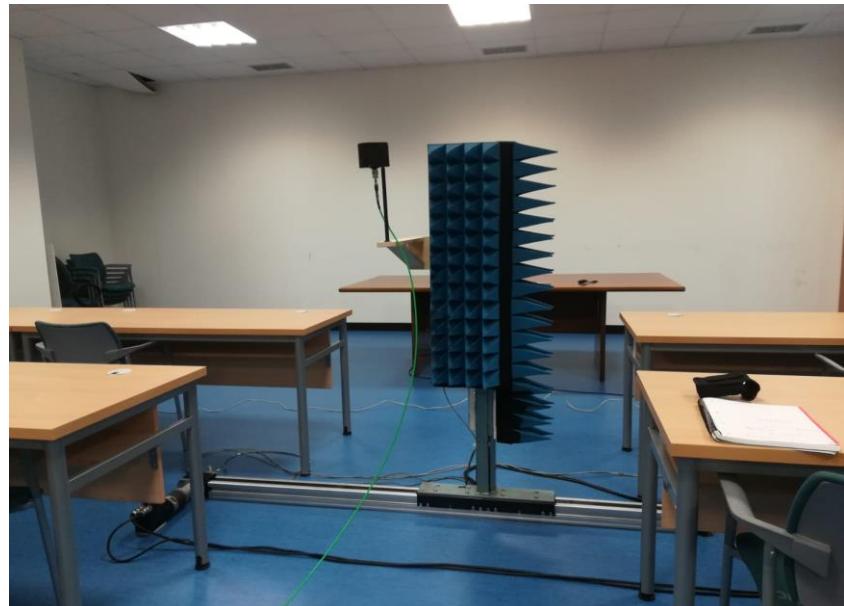
donde  $D_{\text{max}}$  es la distancia máxima sin aliasing y  $c$  la velocidad de la luz.

Además, se configuró el analizador para que transmitiese pulsos con una potencia de 1 mW y un filtro de frecuencia intermedia de 10 kHz.

## 4.3 Escenario 1: Sala multiusos

El primer escenario en el que se han realizado medidas es la sala multiusos situada en la planta -2 del Edificio de Ingeniería de Telecomunicación Profesor José Luis García de la Universidad de Cantabria. En este escenario se han hecho medidas con la antena transmisora en 6 emplazamientos diferentes, todos ellos en situación LOS.

En las Figuras 4.2 y 4.3 se muestran diferentes fotos de la sala multiusos tomadas en el momento en que se hicieron las medidas, y en las que se puede apreciar la disposición de las mesas, estanterías y sistema de medida, entre otros.



**FIGURA 4.2–** Detalle de la posición de la antena receptora en la campaña de medidas.



(a)



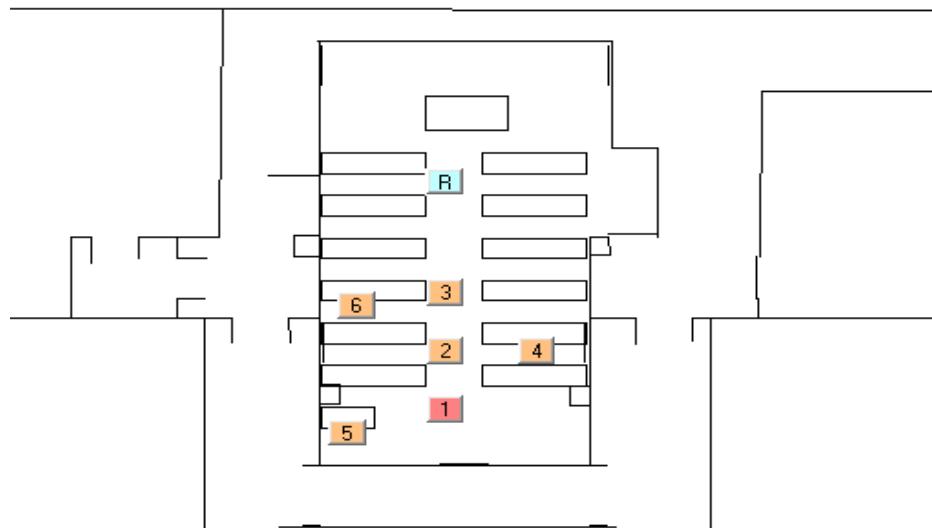
(b)

**FIGURA 4.3–** Fotos de la sala multiusos en la campaña de medida. **(a)** Vista desde la esquina inferior derecha. **(b)** Vista desde la esquina superior izquierda.

En la Figura 4.4 se observa un plano de la sala multiusos en el que se incluyen los detalles del entorno, así como la posición del receptor y de los diferentes emplazamientos elegidos para la antena transmisora.

Tomando como origen y referencia la esquina inferior izquierda de la sala multiusos sobre el plano de la Figura 4.4, las posiciones relativas entre la antena receptora en el punto central del barrido y la antena transmisora en cada posición de medida son las mostradas en la Tabla 4.1.

La altura de la antena transmisora es de 1,48 metros en todas las situaciones de medida, igual que la de la antena receptora en el punto central del barrido plano.



**FIGURA 4.4–** Plano del escenario 1 (sala multiusos y zona colindante) con posiciones del receptor y transmisores.

**TABLA 4.1–** Posiciones relativas de la antenas transmisora y receptora y distancia entre antenas.

Antena	Posición Relativa (m)	Distancia Tx-Rx (m)
Tx 1	(4.4, 1.95)	7.73
Tx 2	(4.4, 3.95)	5.73
Tx 3	(4.4, 5.95)	3.73
Tx 4	(1.6, 3.95)	6.37
Tx 5	(7.37, 1.15)	9.03
Tx 6	(7.11, 5.52)	4.96
Rx	(4.4, 9.68)	--

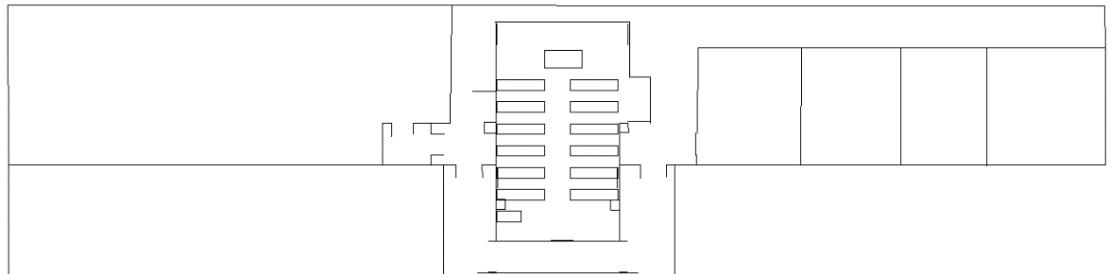
### 4.3.1 Resultados ITU y conclusiones

Como complemento a las medidas, se han realizado simulaciones utilizando el software CINDOOR con el objeto de contrastar medidas y simulaciones sobre el mismo escenario y situaciones de medida. El modelo geométrico del entorno se ha completado considerando para los materiales del entorno las características electromagnéticas recomendadas por la ITU [13]. Las principales características de los materiales que se encuentran en el escenario se resumen en la Tabla 4.2.

El modelo de CINDOOR utilizado en las simulaciones en este primer escenario ha sido denominado “**MultiusosV5**” y el detalle geométrico del entorno se puede observar en la Figura 4.5.

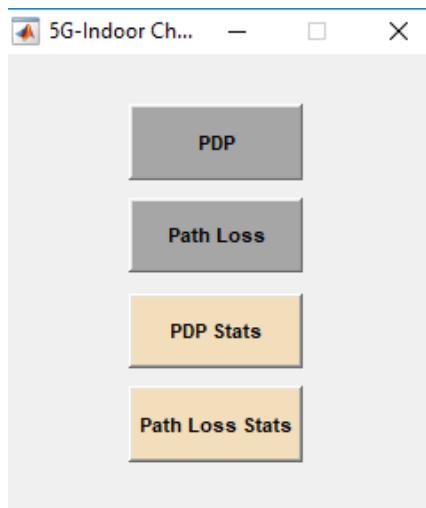
**TABLA 4.2– Recomendaciones de ITU sobre las características electromagnéticas de los materiales del primer escenario.**

Material	Permitividad	Conductividad (S/m)	Pérdidas (dB)	Grosor (cm)	Rugosidad (m)
Pladur	2.94	0.0281	Calculo con CINDOOR	3.00001	0
Hormigón	5.31	0.0889	12.00001		0
Puertas metálicas	1	1E+10	100		0
Mesas madera	1.99	0.01799	Calculo con CINDOOR	3.0000	0
Ladrillo	3.75	0.038	13.00001		0
Cristal	6.27	0.0192	3.500001		0



**FIGURA 4.5– Modelo geométrico/electromagnético de CINDOOR empleado en las simulaciones en el entorno de la sala multiusos.**

Tanto medidas como simulaciones han sido procesadas de forma conjunta con una aplicación de Matlab para obtener de forma automática representaciones gráficas comparativas y algunos parámetros característicos del PDP (Power Delay Profile) como el retardo cuadrático medio o el ancho de banda de coherencia. Se incluye también la posibilidad de estimar las pérdidas de propagación en banda ancha del canal. Mediante esta aplicación, cuya interfaz principal se observa en la Figura 4.6, se permite obtener sobre la misma gráfica el parámetro seleccionado tanto de la simulación como de la medida.



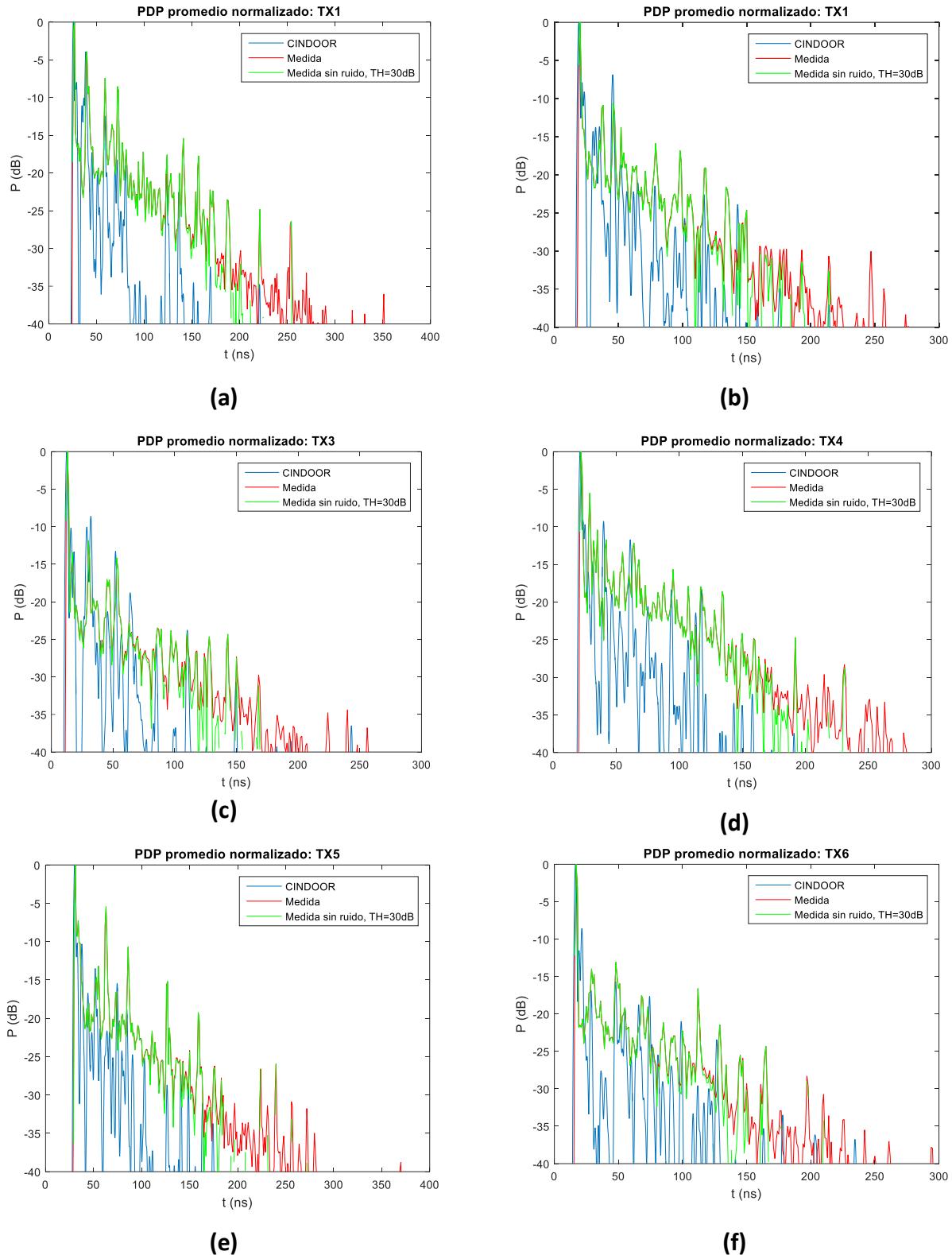
**FIGURA 4.6–** Interfaz gráfica del programa de Matlab que extrae algunos parámetros del PDP y pérdidas de propagación de las simulaciones y medidas.

### PDP (Power Delay Profile)

En la Figura 4.7 se observa el PDP promedio normalizado para cada uno de los 6 emplazamientos de la antena transmisora considerados en este escenario de interior.

Se puede apreciar que, como todos los emplazamientos se encuentran en situación LOS, para esta primera aproximación en la simulación el tiempo que tarda el rayo directo en llegar coincide con el que tarda en las medidas reales. Además, el máximo coincide con el rayo directo en todos los emplazamientos.

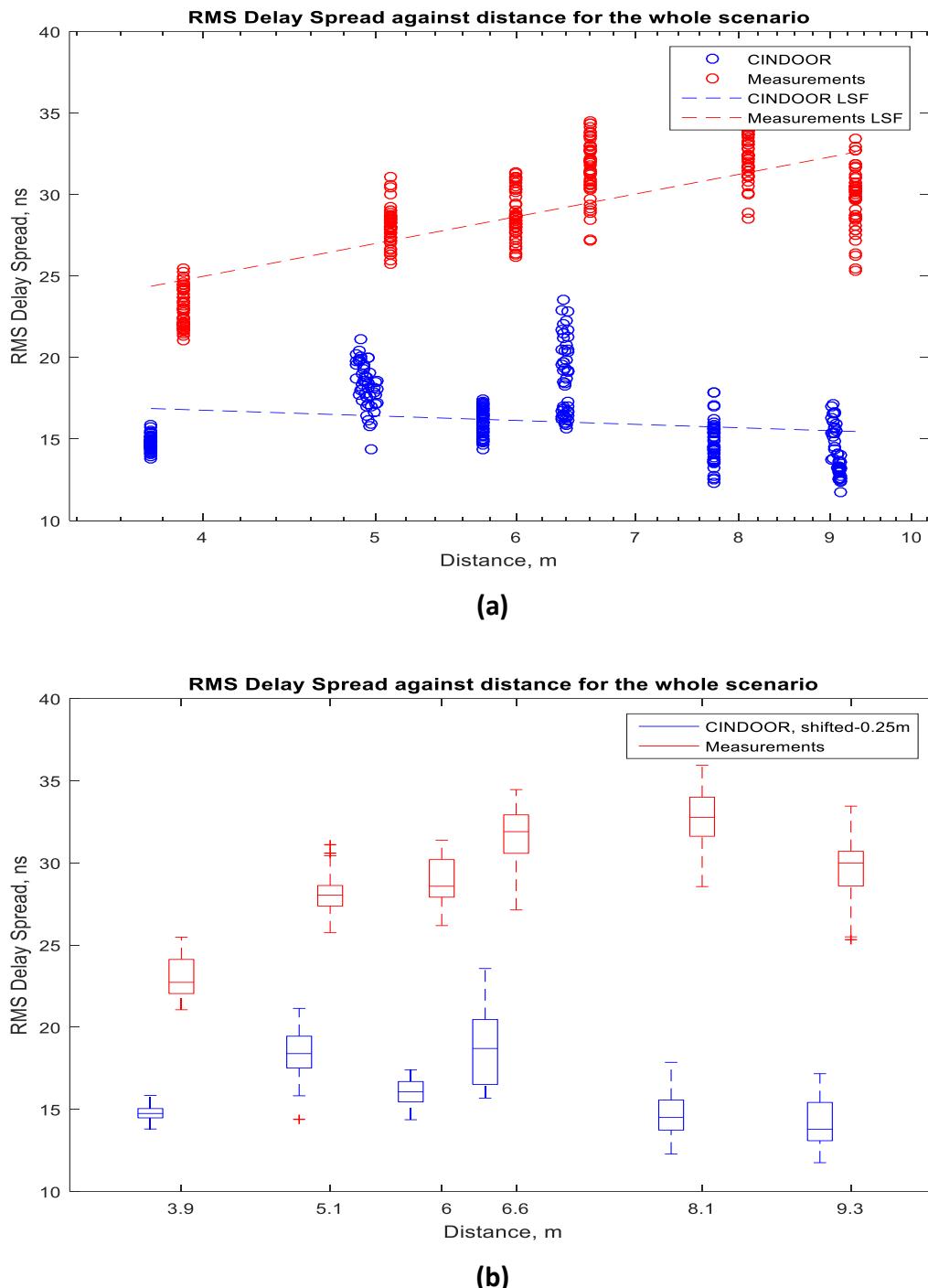
En este primer modelo de simulación no están incluidos algunos elementos que se encontraban en la sala en aquel momento como parte del mobiliario por lo que se comprende que en la simulación lleguen menos rayos debidos a reflexiones.



**FIGURA 4.7 – PDP promedio normalizado de las medidas y simulaciones en el primer escenario. (a) Posición TX1. (b) Posición TX2. (c) Posición TX3. (d) Posición TX4. (e) Posición TX5. (f) Posición TX6.**

### Trms (RMS Delay Spread)

En la Figura 4.8 se muestra la dispersión del retardo en función de la distancia para los 6 emplazamientos de la antena transmisora, incluyendo medidas y simulaciones.



**FIGURA 4.8 – RMS Delay Spread de las medidas y simulaciones en el primer escenario. (a) En forma de puntos. (b) En forma de diagrama de cajas.**

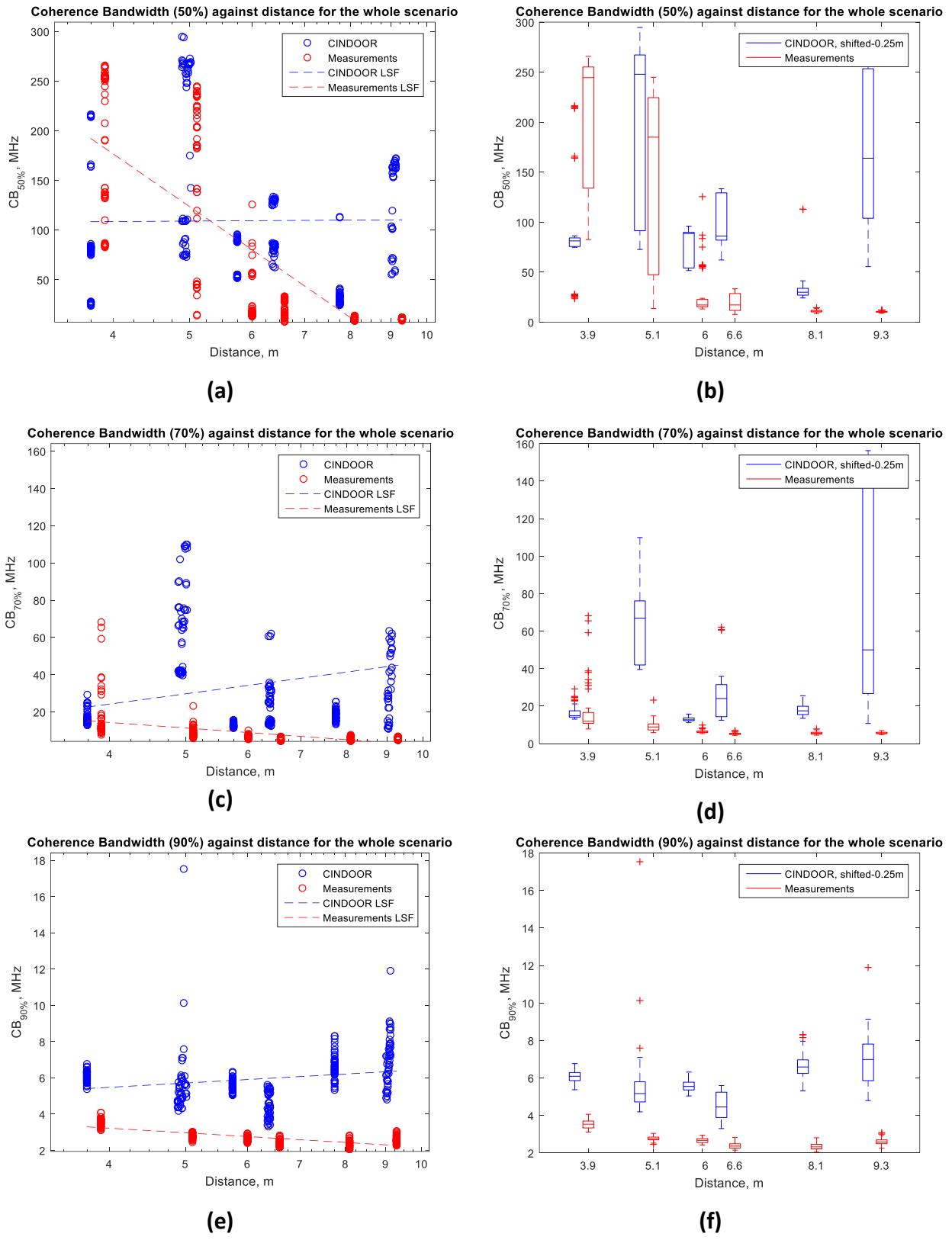
Se puede observar que las medidas presentan mucha dispersión en cada área local y que ésta ha sido también simulada por CINDOOR. Sin embargo, hay una clara diferencia de niveles entre medidas y simulaciones y los valores tan bajos obtenidos en la simulación pueden atribuirse a imperfecciones en las características electromagnéticas consideradas para los materiales o a haber simplificado en exceso el modelo geométrico del entorno; lo cual pudiera justificar esa falta de contribuciones que ya se veían en los PDP de la Figura 4.7 y que influye también en la dispersión del retardo.

La primera vez que se procesaron las medidas, en la gráfica de la dispersión del retardo en función de la distancia aparecía un punto situado a 12 metros que correspondía con la última posición del barrido en el emplazamiento 1 de la antena transmisora (situado en realidad a 8.1 metros de la receptora). Tras analizar el PDP de este punto se pudo observar que el máximo estaba alejado de la contribución del rayo directo debido a las fluctuaciones de los rayos reflejados y, por esa razón, la distancia presentaba ese error. En un principio, el software había calculado Trms tomando como referencia ese máximo y no el rayo directo. Por lo tanto, se modificó el programa para que calcule Trms tomando como referencia el primer pico que aparezca a partir de un nivel de señal mínimo que evite confundir el rayo directo con el ruido (En este caso, -15 dB). Con esta solución se corrigió dicho punto como se puede observar en la Figura 4.8.

### Ancho de banda de coherencia (Bc)

En la Figura 4.9 se incluyen los valores del ancho de banda de coherencia obtenidos al 50, 70 y 90% de correlación en función de la distancia, extraídos tanto de las medidas como de las simulaciones.

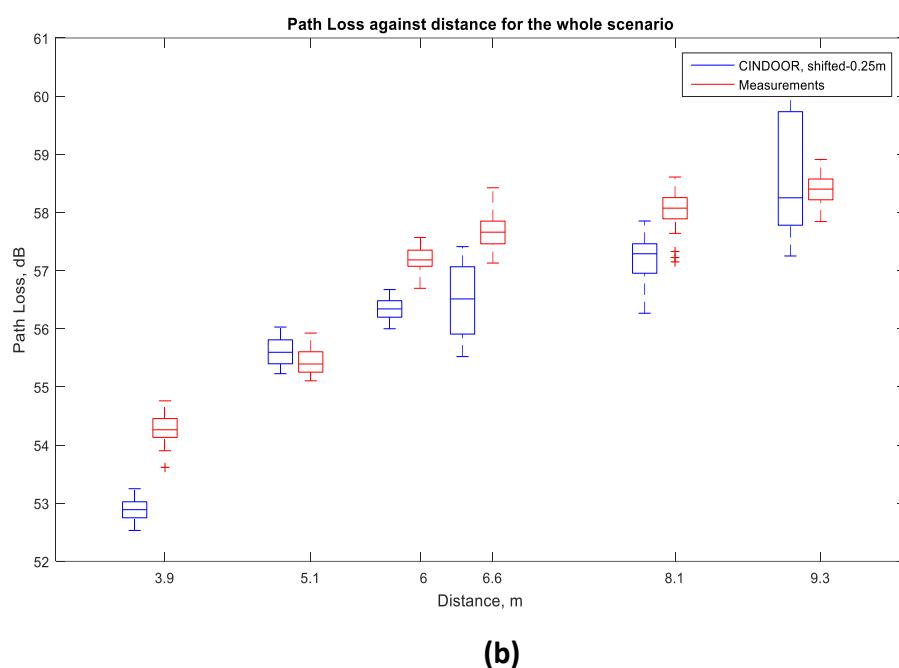
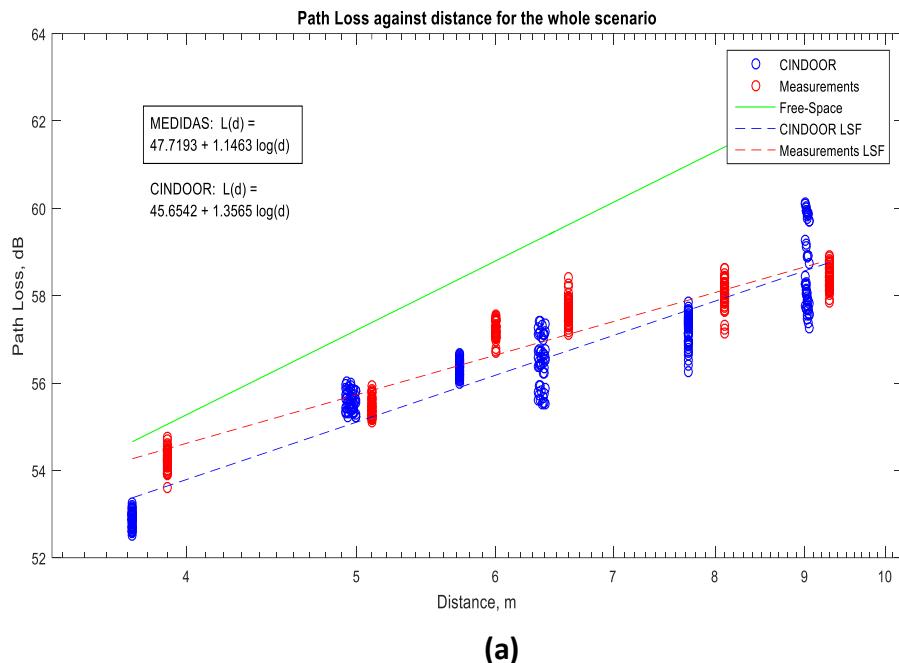
Como es de esperar, lo primero que se observa en los resultados de la Figura 4.9 es que los valores del ancho de banda de coherencia disminuyen para valores de correlación más altos, como se ha comprobado teóricamente en el capítulo 2. Además, esa relación inversa que tiene el *Bc* con el *Trms* justifica que de nuevo se observe una gran dispersión en la gráfica del ancho de banda de coherencia al 50%. Esta dispersión mejora para valores de correlación más altos. Por último, se observa que, aunque en la gráfica del ancho de banda al 90% los resultados de las medidas se acerquen a los de las simulaciones, se mantiene el error que se pudo comprobar analizando el *Trms* puesto que aún distan mucho entre ellos. Por lo tanto, una línea futura de actuación podría dirigirse hacia la mejora del modelo utilizado en CINDOOR para ver si los resultados de las simulaciones se acercan más a los resultados de las medidas.



**FIGURA 4.9 – Ancho de banda de coherencia de las medidas y simulaciones en el primer escenario. (a) Bc 50% por puntos. (b) Bc 50% por diagrama de cajas. (c) Bc 70% por puntos. (d) Bc 70% por diagrama de cajas. (e) Bc 90% por puntos. (f) Bc 90% por diagrama de cajas.**

## Path Loss (Pérdidas de propagación)

En la Figura 4.10 se observan las pérdidas de propagación de las simulaciones y medidas en los 6 emplazamientos en comparación con las pérdidas teóricas de propagación en el espacio libre [14]. Se incluyen sobre las gráficas las leyes potenciales de ajuste lineal de las pérdidas, observando exponentes de pérdidas claramente por debajo del correspondiente al espacio libre ( $n=2$ ).



**FIGURA 4.10** – Path Loss de medidas y simulaciones. (a) En forma de puntos y en comparación con las pérdidas teóricas (b) En forma de diagrama de cajas.

En la Figura 4.10 se observa que, como todos los emplazamientos se encuentran en situación LOS, las pérdidas de propagación de las medidas y simulaciones son muy parecidas, aunque por debajo de las pérdidas en el espacio libre. A medida que aumenta la distancia, la diferencia se acentúa. Esto tiene su justificación en las contribuciones del multicamino, pues al encontrarnos en un escenario cerrado se reciben rayos provenientes de múltiples efectos que en la suma fasorial de todos ellos hace que contribuyan de forma constructiva, con niveles de señal que están por encima de los que se recibirían en condiciones de espacio libre.

Otro aspecto que se puede observar es que las rectas de pérdidas de propagación definidas por los puntos de la gráfica tienen un alto coeficiente de correlación al encontrarse todos los emplazamientos en una clara situación LOS.

Así pues, se puede concluir que, tanto en las medidas como en las simulaciones, los resultados obtenidos para las predicciones de las pérdidas de propagación entran dentro de lo razonable y esperable en el escenario bajo estudio.

## 4.4 Escenario 2: Laboratorio S220

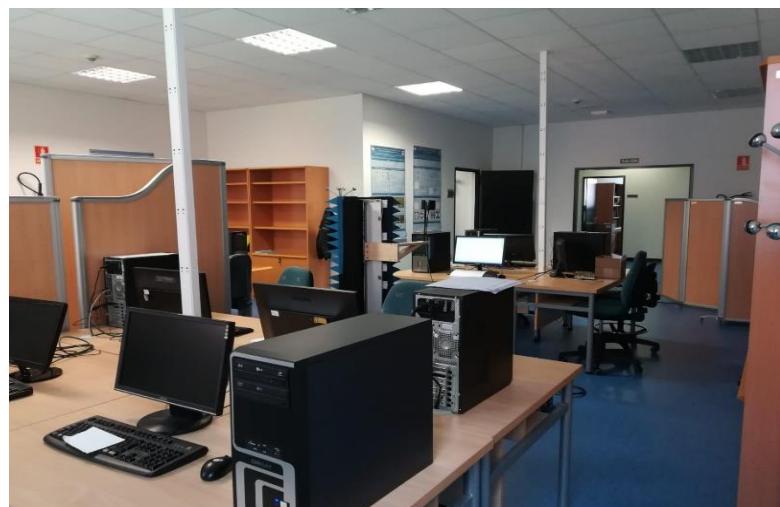
El segundo escenario en el que se han realizado medidas de canal es el laboratorio de simulación S220 de la misma planta. Para el mismo barrido plano de la antena receptora (utilizando una posición fija del escáner plano), en este escenario se han hecho medidas con la antena transmisora en 8 emplazamientos diferentes. A diferencia del escenario 1, en este caso, parte de los emplazamientos se corresponden con situaciones de visión directa entre antenas (LOS) y otros con situaciones de obstrucción parcial o claramente obstructivas (NLOS).

En las Figuras 4.11 y 4.12 se aportan fotos del escenario tomadas en el momento en el que se hicieron las medidas y en las que se puede apreciar la disposición del escáner plano, del pasillo donde se coloca la antena transmisora y del mobiliario y múltiples dispersores que hay en la sala; para dar cuenta de la complejidad que puede tener su modelado geométrico y electromagnético de cara a las futuras simulaciones con el software CINDOOR.

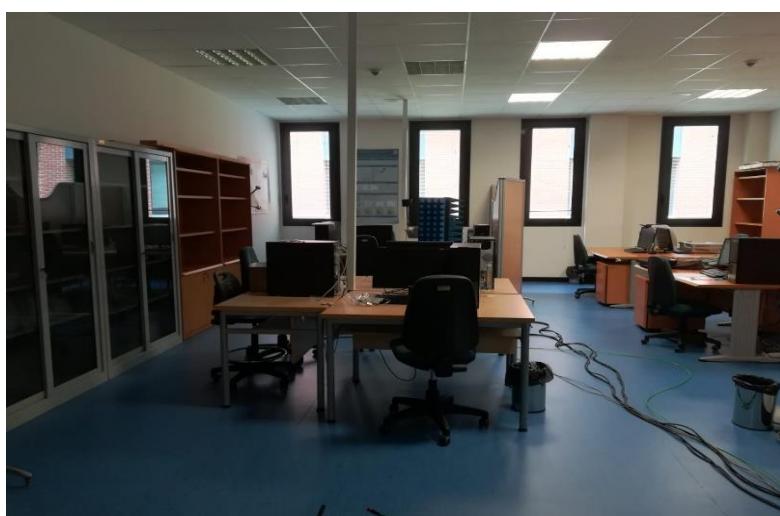
Hay que resaltar que en el escenario hay puertas y armarios metálicos que afectarán a la propagación, así como armarios de madera, ordenadores y mesas con estructura metálica que, lejos de ser modeladas en detalle, pueden influir también notablemente en las posibles diferencias que existan entre los resultados de medidas y simulaciones.



(a)



(b)



(c)

**FIGURA 4.11– Laboratorio de simulación S220. (a) Desde la esquina superior derecha. (b) Desde la esquina superior izquierda. (c) Desde la entrada.**



(a)



(b)

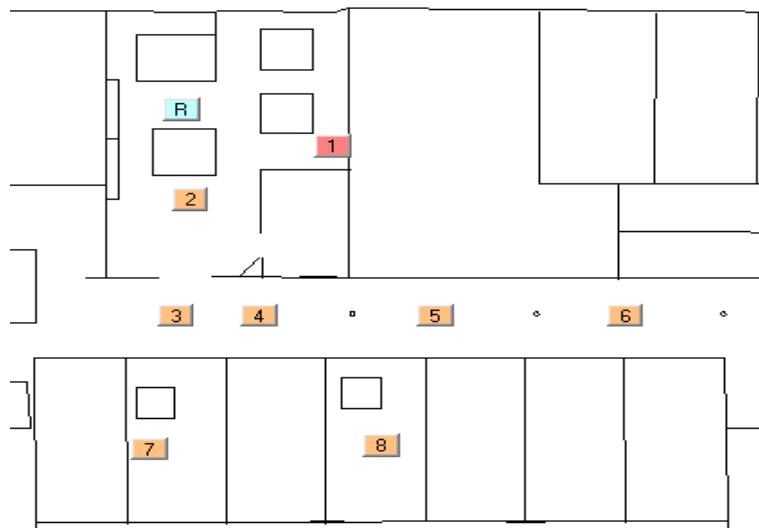
**FIGURA 4.12– Otras zonas del escenario de medida. (a) Almacén colindante con la sala S220. (b) Pasillo exterior de la sala donde se coloca la antena transmисora.**

En la Figura 4.13 se muestra un plano del laboratorio S220 con detalles de la posición del receptor y de los diferentes emplazamientos seleccionados para la antena transmисora.

Tomando como origen de referencia la posición de la antena receptora y en referencia al plano de la Figura 4.13, las posiciones relativas de los emplazamientos de la antena transmисora son las que se incluyen en la Tabla 4.3.

La altura de la antena transmисora es de 1,46 m en todos los emplazamientos mientras que la de la receptora es de 1,48 m en el punto central del barido.

Los emplazamientos 1 y 2 se encuentran en la misma sala que la antena receptora y están en situación LOS. La posición 3 se sitúa en el pasillo, aunque en el momento de realizar las medidas se desmontó la puerta de entrada a la sala propiciando que este emplazamiento se encuentre también en situación LOS. El emplazamiento 4 se encuentra en el pasillo en situación NLOS puesto que el rayo directo ha de atravesar una pared de pladur y la puerta metálica que se encontraba abierta de la misma forma que aparece en la Figura 4.12(a). Las posiciones 5, 6 y 8 se corresponden con situaciones claramente NLOS y con un grado de obstrucción diferente según el caso. La posición 7, pese a que el rayo directo ha de atravesar una pared de pladur, se puede considerar que está en situación LOS.



**FIGURA 4.13–** Plano del escenario 2 con posiciones del receptor y transmisores.

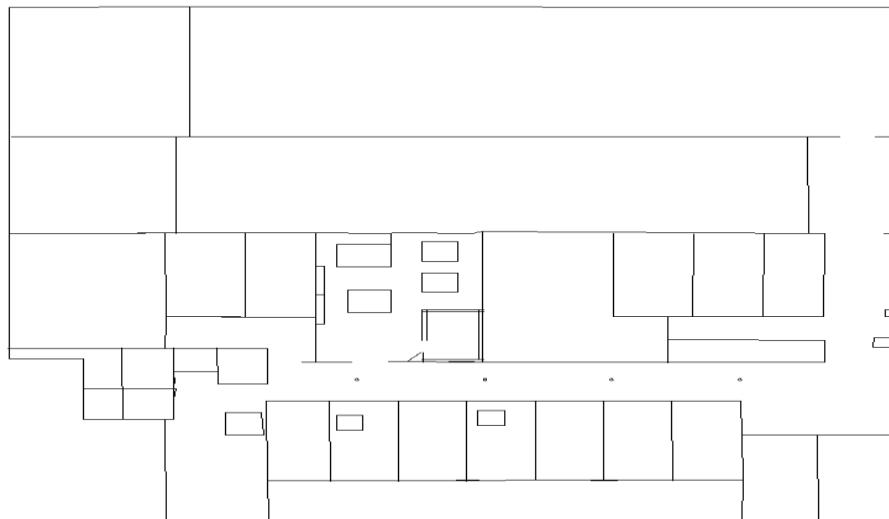
**TABLA 4.3–** Posiciones relativas de los emplazamientos de la antena transmisora y distancia en metros con respecto a la antena receptora.

Antena	Posición Relativa (m)	Distancia Tx-Rx (m)
Tx 1	(4.69, -1.46)	4.91
Tx 2	(0.26, -3.57)	3.58
Tx 3	(-0.18, -8.17)	8.17
Tx 4	(2.41, -8.17)	8.52
Tx 5	(7.89, -8.17)	11.36
Tx 6	(13.76, -8.17)	16
Tx 7	(-1, -13.47)	13.51
Tx 8	(6.2, -13.33)	14.7

#### 4.4.1 Resultados ITU y conclusiones

Para contrastar con CINDOOR los resultados obtenidos en las medidas en transmisión del parámetro S21 realizadas en el laboratorio S220, se ha utilizado un modelo geométrico del entorno sobre el que se han aplicado las propiedades electromagnéticas de los materiales de acuerdo a los valores recomendados por la ITU [13] y que coinciden con los ya expuestos con anterioridad en la Tabla 4.2.

El modelo de CINDOOR utilizado en la simulación de las medidas en este escenario ha sido denominado como “**GISAR220\_v11**” y se puede observar en la Figura 4.14.



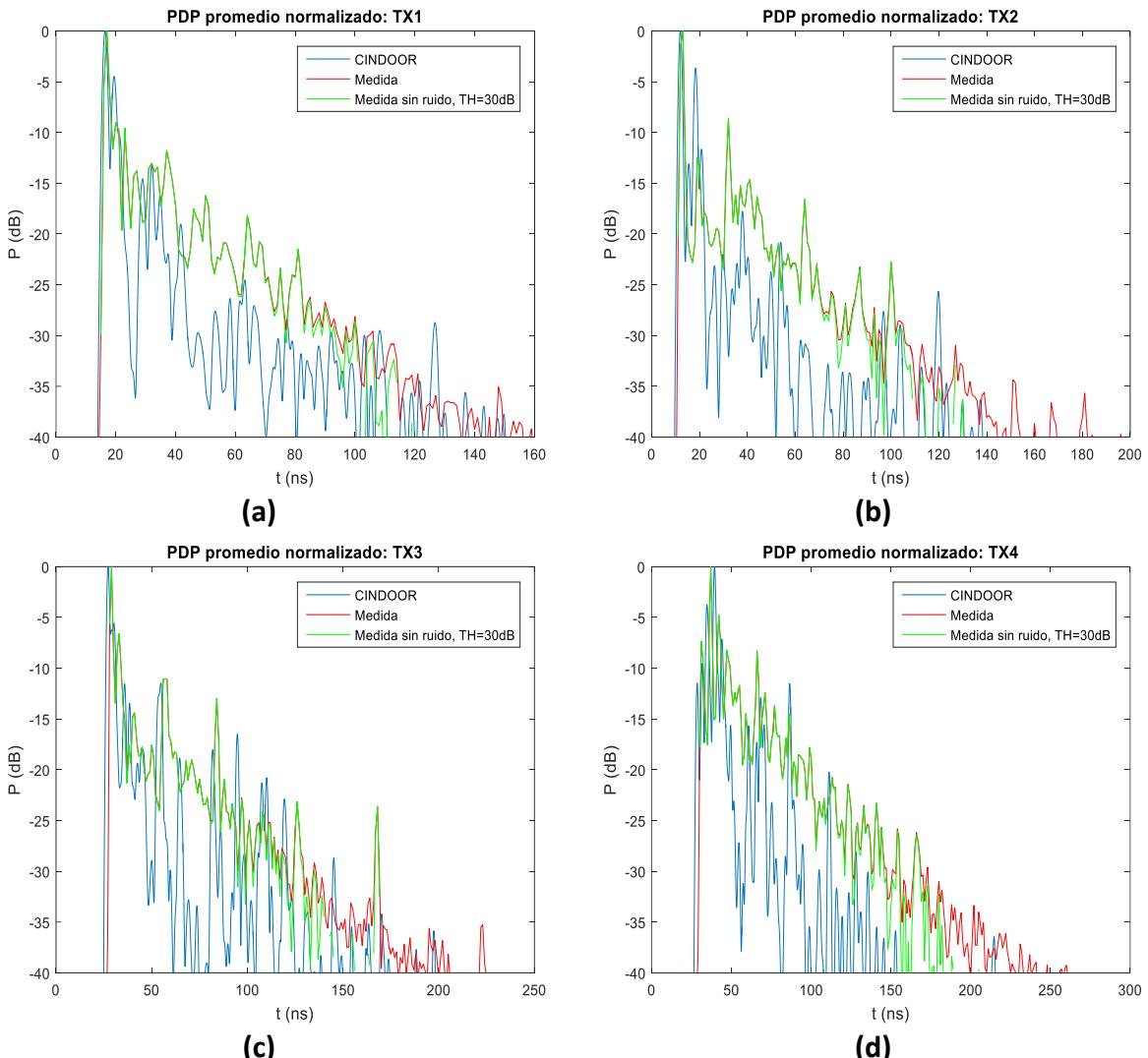
**FIGURA 4.14–** Modelo geométrico/electromagnético de CINDOOR empleado en las simulaciones en el entorno del laboratorio S220

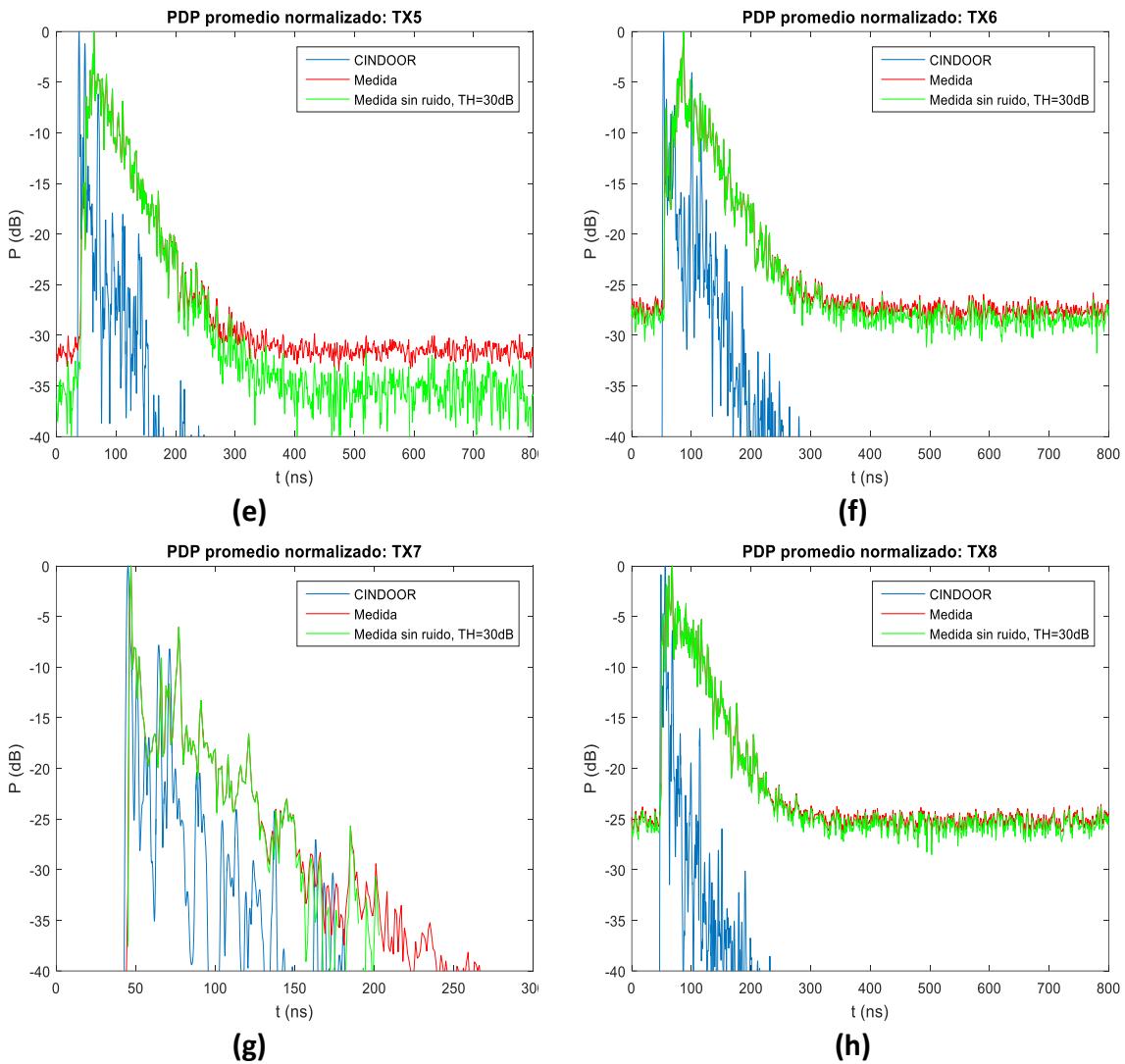
Los resultados de medidas y simulaciones se han procesado utilizando la misma aplicación de Matlab y cuya interfaz principal ya se mostró en la Figura 4.6. El estudio, de nuevo, se ha centrado en obtener estadísticos importantes a partir del PDP y en el análisis de las pérdidas de propagación en banda ancha del canal.

## PDP (Power Delay Profile)

En la Figura 4.15 se observa el PDP promedio normalizado para cada uno de los 8 emplazamientos de la antena transmisora en la segunda campaña de medidas. Hay que destacar que el PDP promedio se obtiene fruto de promediar los PDPs asociados con cada uno de los puntos del barrido plano.

Se aprecia que en los emplazamientos en situación LOS (1,2, 3 y 7) el rayo directo coincide con el máximo, y los resultados de simulaciones y medidas son parecidos. Sin embargo, en los emplazamientos en situación NLOS como la 4 ya se aprecia que el máximo no se debe al rayo directo sino a otras contribuciones del multicamino. Esto se observa también para los emplazamientos 5, 6 y 8 en donde, además, se puede comprobar que los resultados de las simulaciones distan mucho de los de las medidas y, se aprecia que las contribuciones de CINDOOR del multicamino son insuficientes y no se descarta que sea por fenómenos de scattering que no se estén considerando en el modelado.





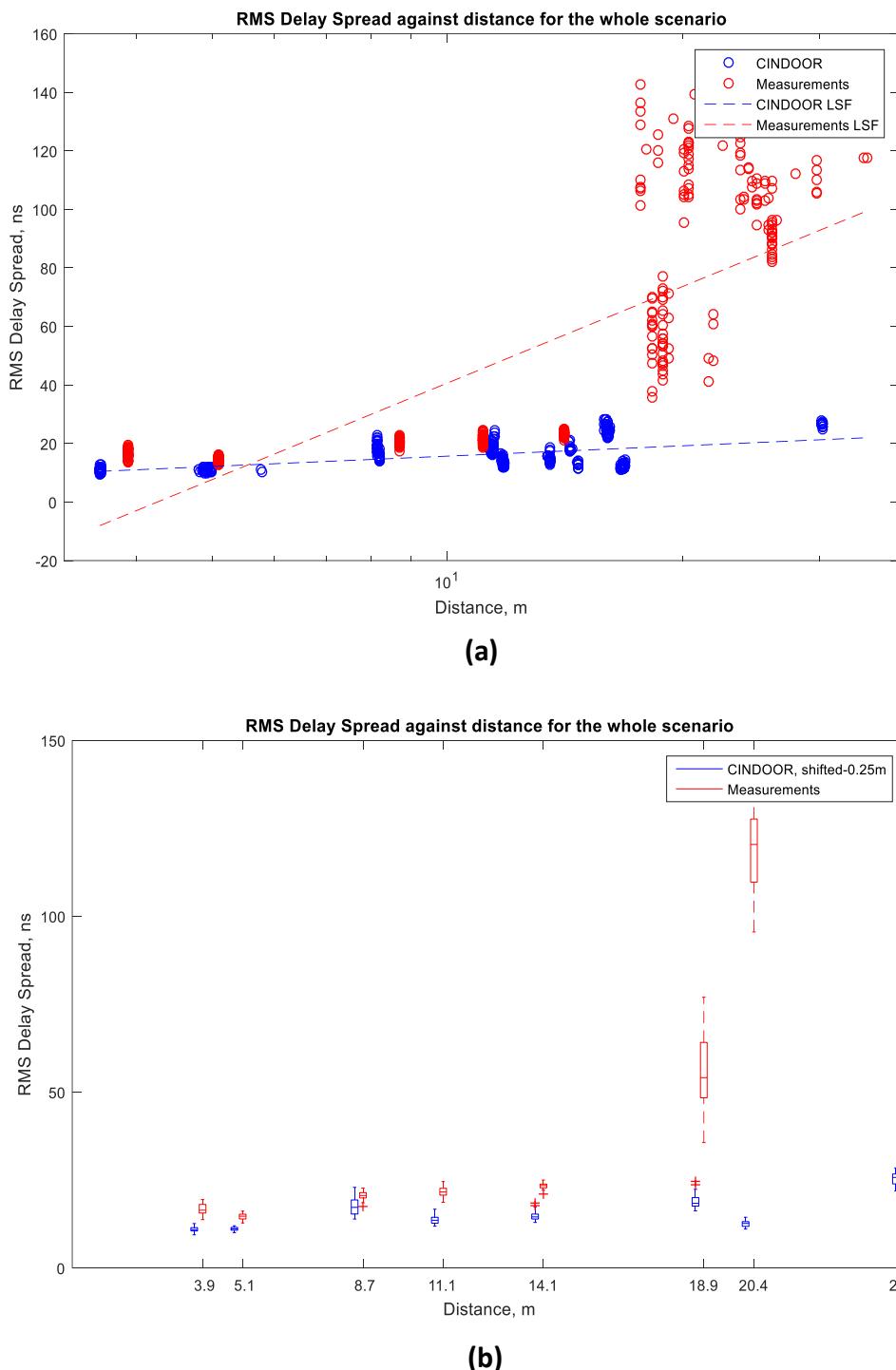
**FIGURA 4.15 – PDP promedio normalizado de las medidas y simulaciones en el escenario 2. (a) Posición TX1. (b) Posición TX2. (c) Posición TX3. (d) Posición TX4. (e) Posición TX5. (f) Posición TX6. (g) Posición TX7. (h) Posición TX8.**

### Trms (RMS Delay Spread)

En la Figura 4.16 se observa la dispersión del retardo en función de la distancia para los 8 emplazamientos de la antena transmisora, medidas y simulaciones, así como las rectas de regresión y ajuste para ambas series de datos.

Se puede observar que los resultados de las medidas y simulaciones en los emplazamientos que se encuentran en situación LOS salen parecidos. Sin embargo, en las situaciones con mayor obstrucción, la falta de contribuciones que ya se veía sobre el propio PDP en las simulaciones hace que las diferencias sean importantes, con valores muy superiores en el caso de las medidas.

El Trms se obtiene básicamente por integración del PDP, luego parecía lógico intuir a partir de los PDPs de la Figura 4.15 lo que iba a ocurrir. La falta de contribuciones a la potencia en el receptor cuando se habla de las simulaciones y se centra en el PDP, explica que ahora los valores del Trms obtenidos al simular estén muy por debajo en el caso de las simulaciones.



**FIGURA 4.16 – RMS Delay Spread de las medidas y simulaciones del segundo escenario. (a) En forma de puntos. (b) En forma de diagrama de cajas.**

## Ancho de banda de coherencia (Bc)

En la Figura 4.17 se observa el ancho de banda de coherencia al 50, 70 y 90% en función de la distancia, extraídos tanto de las medidas como de las simulaciones.

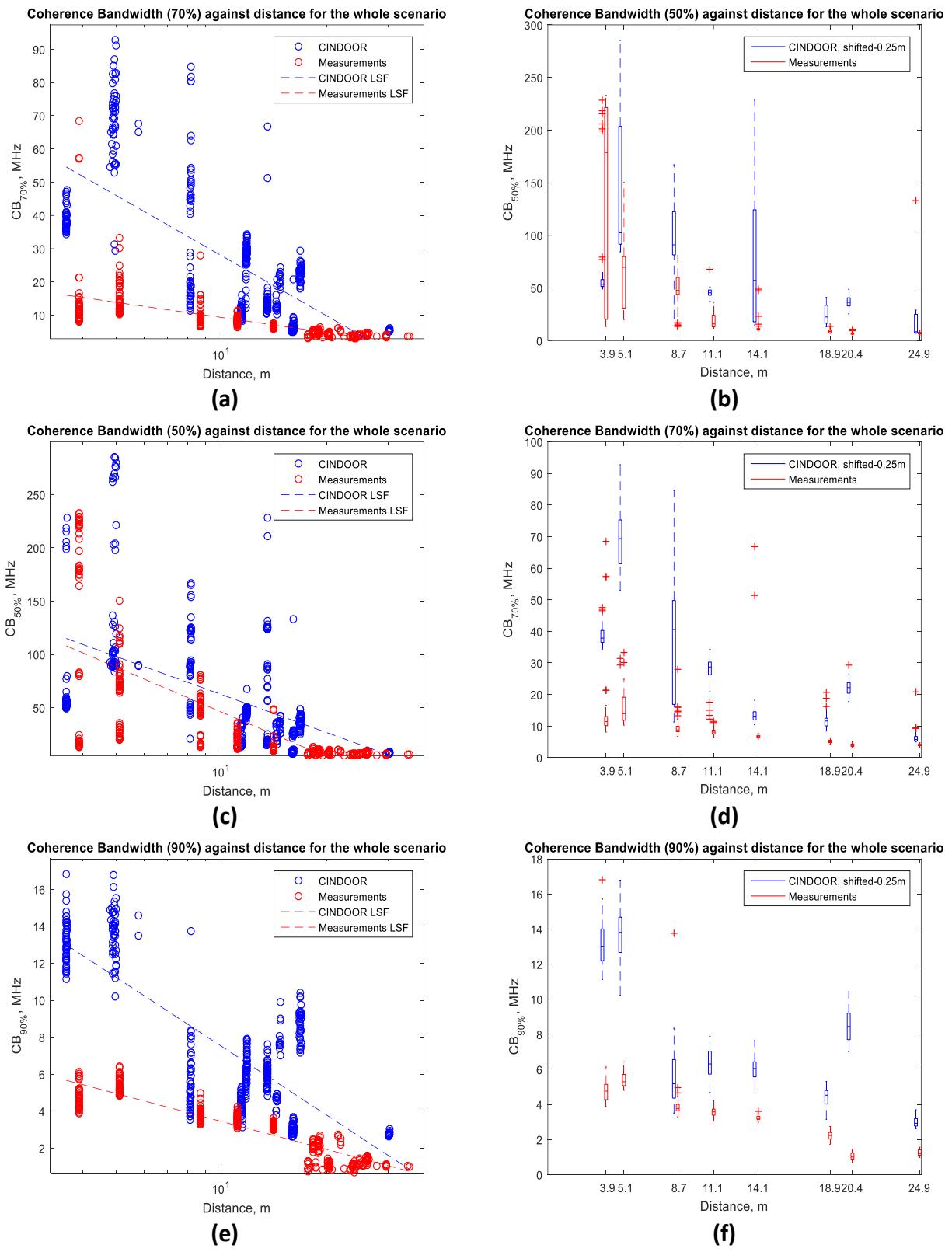
Se puede observar que el ancho de banda de coherencia disminuye para valores de correlación más altos y mejora la dispersión. Sin embargo, incluso en la gráfica del ancho de banda de coherencia al 90%, los resultados de las medidas y simulaciones distan mucho entre ellos ya que se mantiene el error que se pudo comprobar analizando el Trms.

Por lo tanto, al margen de realizar nuevas medidas en escenarios menos complejos, podría probarse como línea futura de actuación a mejorar el grado de detalle de los dispersores considerados en el modelo geométrico utilizado en CINDOOR.

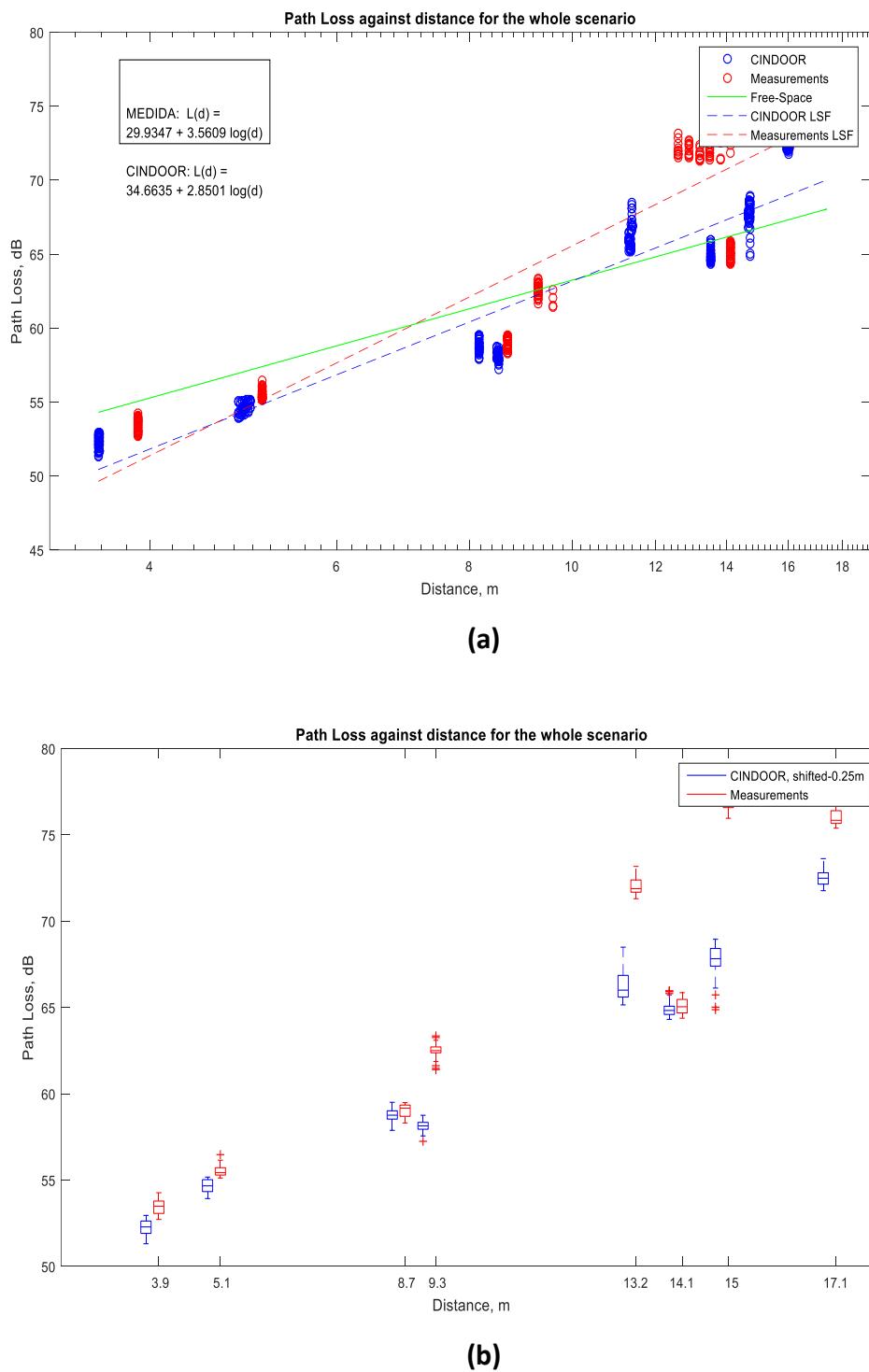
## Path Loss (Pérdidas de propagación)

En este TFG también se han analizado las pérdidas de propagación del canal radio de interiores en banda ancha. En este sentido, en la Figura 4.18 se incluyen las dos representaciones típicas que se han utilizado en este capítulo para mostrar en este caso las pérdidas de propagación frente a la separación entre antenas, incluyendo en la representación tanto las pérdidas estimadas a partir de las medidas como las propias extraídas de las simulaciones. Se incluyen las rectas de ajuste obtenidas por regresión para las dos series de datos y las pérdidas teóricas de propagación en el espacio libre [14].

Si se centra en primer lugar en la comparativa entre medidas y simulaciones, puede observarse que las medidas y las simulaciones se aproximan con cierto grado de exactitud en las situaciones de medida LOS, mientras que en las zonas con mayores obstrucciones las diferencias crecen, dado que se mezclan situaciones no homogéneas (LOS y NLOS) en la misma comparativa. Estas diferencias, más notables en el caso de situaciones claramente obstructivas, pudieran justificarse en parte en las simulaciones debido a que, o bien los valores utilizados para representar el efecto de los materiales de construcción en el modelo no están bien ajustados o, por otra parte, se precisa un mayor grado de detalle en el modelo geométrico. Obviamente, debe tomarse un compromiso entre la exactitud y fidelidad al representar el escenario y los tiempos de computo asumibles al simular. Por ejemplo, en el almacén hay material almacenado sobre estanterías metálicas que no se han modelado y en la propia estancia S220 ni los cuerpos metálicos de las mesas ni los propios ordenadores se han incluido (no todos los detalles al menos) en el modelo equivalente utilizado en las simulaciones.



**FIGURA 4.17 – Ancho de banda de coherencia de las medidas y simulaciones en el segundo escenario. (a) Bc 50% por puntos. (b) Bc 50% por diagrama de cajas. (c) Bc 70% por puntos. (d) Bc 70% por diagrama de cajas. (e) Bc 90% por puntos. (f) Bc 90% por diagrama de cajas.**



**FIGURA 4.18 – Path Loss de las medidas y simulaciones del segundo escenario. (a) En forma de puntos y en comparación con las pérdidas teóricas (b) En forma de diagrama de cajas.**

# Capítulo 5. Conclusiones y líneas futuras

## 5.1 Conclusiones

El objetivo de este proyecto es estudiar y obtener conclusiones del canal radio a frecuencias entre 3 y 4 GHz en los diferentes escenarios en los que se ha medido. Las conclusiones obtenidas son el resultado, principalmente, del análisis de las pérdidas de propagación y de algunos parámetros extraídos del perfil potencia retardo (PDP, Power Delay Profile), tanto de las medidas como de las simulaciones.

Como se detalla en el capítulo 4, muchos de los parámetros de caracterización del canal obtenidos en las simulaciones difieren de los obtenidos en la campaña de medida. Entre otras muchas razones, cabe destacar que es muy difícil obtener con CINDOOR un modelo de simulación idéntico al escenario que se trata de reproducir.

Para tratar de acercar los resultados de las simulaciones a los de las campañas de medida han tenido que ser realizadas varias versiones de modelos de simulación, cada cual con más detalles que la anterior. Así pues, para simular el escenario 1 en el que todas las medidas se encontraban en situación LOS, no ha sido necesario incluir modelos con muchos detalles. Sin embargo, para simular el escenario 2, ha sido necesario definir más detalles puesto que algunas medidas se encontraban en situación NLOS y la simulación difería bastante de la realidad. Cabe destacar que los modelos únicamente se han basado en las recomendaciones de ITU sobre las características electromagnéticas de los materiales, por lo tanto, podrían mejorarse.

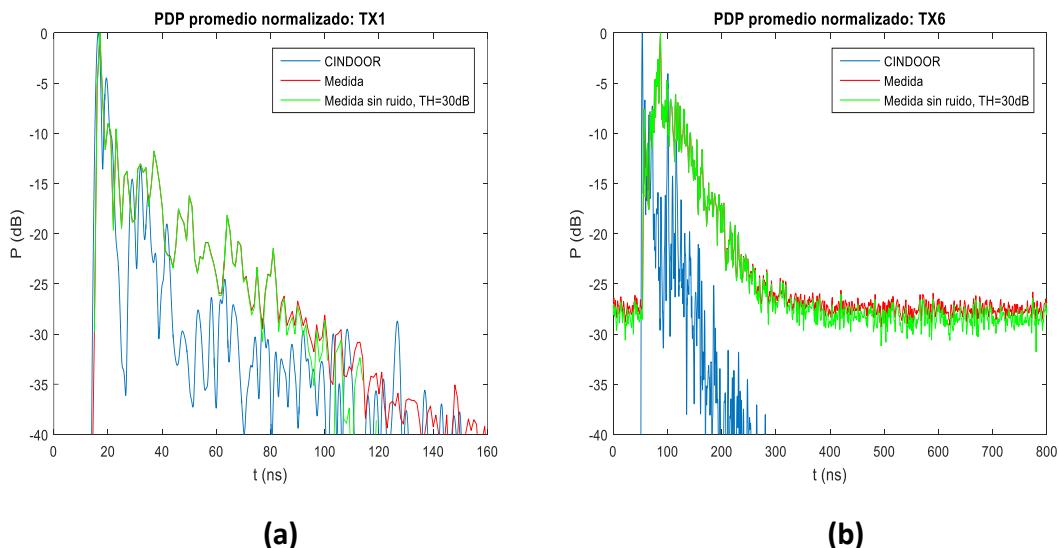
Por otra parte, cabe destacar que el sistema de medida que se ha empleado en este proyecto presenta algunos elementos que hacen que los resultados del canal difieran de la realidad. Así pues, entre otras cosas, se han utilizado cables coaxiales

para conectar el analizador con las antenas que presentan unas pérdidas adicionales de inserción. De la misma forma, para obtener las medidas se ha descontado las ganancias de las antenas basándose únicamente en los valores de ganancia obtenidos del datasheet proporcionado por el fabricante [10], cuya información no es del todo completa puesto que son muestras tomadas cada 500 MHz.

Por lo tanto, las medidas realizadas en los dos escenarios permiten hacerse una idea de cómo es su canal radio a frecuencias entre 3 y 4 GHz, y en situaciones LOS y NLOS. Esto es importante puesto que, como se ha detallado en el capítulo 1, conocer el canal radio de un sistema en una banda de frecuencias candidata a ser utilizada con la tecnología 5G se considera fundamental para el desarrollo de ésta.

Por otra parte, comparando los resultados de las medidas con los de las simulaciones, se puede concluir que, o bien los valores utilizados para representar el efecto de los materiales en los modelos de simulación utilizados no están bien ajustados, o se precisa un mayor grado de detalle en el modelo geométrico. Además, en situaciones de visión menos favorables, los resultados de las simulaciones difieren más de los de las medidas, por lo que es más necesaria esta corrección.

En la Figura 5.1 se puede observar una comparativa del PDP en dos situaciones diferentes (LOS, y NLOS) que demuestra lo explicado en el anterior párrafo. En primer lugar, se aprecia que el PDP de las simulaciones carece de determinadas componentes multicamino que, sin embargo, están presentes en el PDP de las medidas. Por otra parte, se observa también que, por lo general, en situaciones menos favorables, el PDP de las simulaciones dista del de las medidas.



**FIGURA 5.1**– PDP de algunas medidas y simulaciones del escenario 2. (a) En el emplazamiento 1 (LOS). (b) En el emplazamiento 6 (NLOS).

## 5.2 Líneas futuras

El primer objetivo que plantea la continuación de este proyecto en el futuro consiste en tratar de acercar los resultados de las medidas y simulaciones a la realidad y, para ello, habría que centrarse en los siguientes aspectos:

- Utilizar un mayor grado de detalle en los modelos geométricos utilizados en las simulaciones. Aunque se observó que introducir ciertos dispersores en los modelos utilizados no aportaba grandes mejoras en los resultados y elevaba los tiempos de cómputo significativamente, podría pensarse en introducir un mayor grado de detalle de los escenarios con el fin de descartar que las diferencias entre medidas y simulaciones se deban a carencias en el modelado de los escenarios.
- Ajustar en la simulación los valores empleados para representar el efecto de los materiales en los modelos de simulación utilizados. En esta tarea ya se están realizando actualmente en el grupo investigador pruebas para intentar utilizar unos valores adecuados para las propiedades electromagnéticas de los materiales, aunque la heterogeneidad de los múltiples materiales que conforman paredes y techos lo hace difícil.
- Utilizar en las campañas de medida futuras un amplificador de potencia para compensar en cierta medida las pérdidas de cables y canal y tener un mayor rango dinámico en las medidas.
- Utilizar otro tipo de antenas, sectoriales o directivas, que permitan también ver el efecto concreto de tabiques y de ciertas zonas del escenario de medida, pudiendo separar o forzar más claramente las situaciones LOS y NLOS.

# Capítulo 6. Referencias

- [1] UMTS, “*Mobile Traffic Forecasts 2010-2020 Report*”, UMTS Forum, Enero 2011.
- [2] Cisco, “*Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update: 2013-2018*”, Cisco, Febrero 2014.
- [3] Samsung R&D, “*5G Vision*”, Febrero 2015.
- [4] ITU, “*IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond*”, Septiembre 2015.
- [5] T. E. Bogale y L. B. Le, “*Massive MIMO and mmWave for 5G Wireless hetnet*”, IEEE Vehicular Technology Magazine, Vol. 11, No. 1, pp. 64-75, 2016.
- [6] Jeffrey y otros, “*What will 5G be?*”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 32, No. 6, 2014.
- [7] GSA, “*The Future of IMT in the 3300-4200 MHz Frequency Range*”, Junio 2017.
- [8] Government Institutes, Federal Standard 1037C, “*Telecommunications, Glossary of Telecommunication Terms*”, Febrero 1997.
- [9] ITU, “*Cálculo de la atenuación en el espacio libre*”, Rec. UIT-R P.525-2 1, Noviembre 2016.
- [10] Electro-metrics, “*Omni-directional Wideband Antenna Model EM-6865*”, Octubre 2016 (Datasheet antenas).
- [11] Iván López Barriuso, “*Diseño de un entorno automatizado de caracterización de antenas*”, Trabajo Fin de Carrera, Universidad de Cantabria, Julio 2005.
- [12] R. P. Torres, L. Valle, M. Domingo, S. Loredo, y M. C. Diez, DICOM, “*CINDOOR: An Engineering Tool for Planning and Design of Wireless Systems in Enclosed Spaces*”, Agosto 1999.

- [13] ITU, *“Efectos de los materiales y estructuras de construcción en la propagación de las ondas radioeléctricas por encima de unos 100 MHz”*, Rec. UIT-R P.2040-1, Julio 2015.
- [14] Tokyo Institute of Technology, *“Free space link Budget estimation scheme for ultra wideband impulse radio with imperfect antennas”*, IEICE Electronics Express, Vol. 1, No. 7, 188-192, Julio 2004.