

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



***Trabajo Fin de Grado***

**Contribución al análisis en banda estrecha  
del canal radio en interiores en la banda de  
10 GHz**

**(Contribution to the narrowband analysis of  
the indoor radio channel in the 10 GHz band)**

Para acceder al Título de

***Graduado en  
Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación***

Autor: Manuel Ruiz Martínez

Octubre - 2017

# **GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN**

## **CALIFICACIÓN DEL TRABAJO FIN DE GRADO**

**Realizado por:** Manuel Ruiz Martínez

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

**Título:** "Contribución al análisis en banda estrecha del canal radio en interiores en la banda de 10 GHz"

**Title:** "Contribution to the narrowband analysis of the indoor radio channel in the 10 GHz band "

**Presentado a examen el día:** 27 de octubre de 2017

para acceder al Título de

## **GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN**

### Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre): Rafael P. Torres Jiménez

Secretario (Apellidos, Nombre): Jesús Ramón Pérez López

Vocal (Apellidos, Nombre): Luis Valle López

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

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

Fdo.: El Director del TFG  
(sólo si es distinto del Secretario)

Vº Bº del Subdirector

Trabajo Fin de Grado Nº  
(a asignar por Secretaría)



## **Agradecimientos**

Agradecer a todas las personas que me han dado apoyo y me han ayudado a lo largo de mi trayectoria académica.

Un especial agradecimiento al director de mi Trabajo de Fin de Grado, Jesús Ramón Pérez López, por su paciencia y su guía durante todo el proyecto y a Rafael Pedro Torres Jiménez por su ayuda y consejos.

Muchas gracias.

## **Resumen**

En este Trabajo de Fin de Grado se ha realizado la caracterización en banda estrecha del canal radio en entornos de interior. Dicha caracterización se ha realizado a través del análisis de una serie de medidas comparadas con simulaciones en el programa CINDOOR. La banda de frecuencia analizada se sitúa en torno a los 10GHz, una de las bandas en las cuales se tiene previsto el despliegue de la tecnología 5G.

## **Abstract**

This end-of-degree Project has taken of the characterization of the narrowband in the indoor radio channel. Said analysis has been articulated through a series of measures compared with simulation in the CINDOOR software. The frequency band analyzed is places around 10 GHz, one of the bands in which the 5G technology is predicted to be deployed.

# Índice

<b>1. Introducción y objetivos</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Organización de la memoria	2
1.4. Cronología de las tareas	2
<b>2. Caracterización del canal radio en banda estrecha</b>	<b>4</b>
2.1. Introducción	4
2.2. Propagación multicamino	4
2.3. Modelado de la señal en un entorno multicamino	6
2.4. Estadísticas del canal en banda estrecha	7
2.4.1. Media de la potencia	7
2.4.2. Estadísticas de la envolvente	7
<b>3. Sistema de medida y entorno de simulación</b>	<b>9</b>
3.1. Introducción	9
3.2. Sistema de medida del canal radio	9
3.2.1. Posicionador SMT-BD1/m	10
3.2.2. Antenas	12
3.2.3. Unidades lineales WH80 y WH00	13
3.2.4. Motores BLS-72 y BLS-55	14
3.2.5. Reductor PL.BGT 800/2	15
3.2.6. Analizador de redes	15
3.3. Descripción de la aplicación software	16
3.3.1. Configuración de puertos	17
3.3.2. Barrido plano	17
3.3.3. Analizador	19
3.3.4. Cargar y visualizar medidas	20
3.4. Simulación del canal radio: CINDOOR	21
3.4.1. Modelado geométrico y electromagnético del entorno	21
3.4.2. Modelos de propagación en CINDOOR	22
3.4.3. Trazado de rayos	22
3.4.4. Caracterización del canal radio en CINDOOR	23
3.5. Modificaciones añadidas al software de medida del canal radio	24
<b>4. Medidas y resultados</b>	<b>27</b>
4.1. Introducción	27
4.2. Entorno de medida y resultados	27
4.2.1. Procedimiento de medidas	27
4.2.2. Resultados y escenario de medidas	28

<b>5. Conclusiones y líneas futuras</b>	<b>46</b>
5.1. Conclusiones	46
5.2. Líneas futuras	46
<b>Bibliografía</b>	<b>47</b>

# **Lista de Figuras**

2.1. Ejemplo gráfico de la propagación multicamino.	5
3.1. Diagrama de bloques del sistema de medida.	10
3.2. Estructura en anillo de los controladores.	11
3.3. Detalle de los controladores SMT BD/1 y alimentación asociada.	12
3.4. Antena EM-6865.	12
3.5. Ganancia antena transmisora EM-6865.	13
3.6. Ganancia antena receptora EM-6865.	13
3.7. Unidad lineal WH.	14
3.8. Detalle del motor de la serie BLS.	14
3.9. Reductor PL.BGT 800/2.	15
3.10. Analizador de redes PNA E8362A.	15
3.11. Ventana con menú principal de acceso a funciones de configuración, medidas y representación de resultados.	16
3.12. Ventana de configuración de la conectividad de controladores de posición y equipo de medida.	17
3.13. Ventana principal para la gestión del barrido plano, con acceso a funciones de posicionamiento manual de antena y de configuración del barrido.	18
3.14. Ventana de acceso a la configuración de los parámetros de medida con el analizador de redes.	19
3.15. Ventana principal de Cargar y visualizar medida.	20
3.16. Caracterización electromagnética de las paredes.	21
3.17. Ejemplo de trazado de rayos en CINDOOR.	23
3.18. Programa Cargar y visualizar medida modificado.	24
3.19. Ejemplo de gráfica incluyendo la media local de la medida.	25

3.20. Gráfica de la probabilidad acumulada de la medida	25
4.1. Plano del Departamento Ingeniería de Comunicaciones, Planta -2, Zona Pasillo, con detalle de la situación de las antenas.	27
4.2. Detalle del entorno de medida, equipo de medida y antena receptora.	28
4.3. Detalle de la antena transmisora.	28
4.4. Potencia Instantánea y media local medidas y simuladas. (Pasillo)	30
4.5. Probabilidad acumulada de la potencia por encima de la media normalizada. (Pasillo)	32
4.6. Plano del Entorno de medida en el Laboratorio de Simulación. Situación aproximada de las antenas y las diferentes situaciones de las unidades lineales.	33
4.7. Foto panorámica del Laboratorio de Simulación, S220	33
4.8. Potencia Instantánea y media local medidas y simuladas. (Laboratorio Longitudinal)	35
4.9. Probabilidad acumulada de la potencia por encima de la media normalizada. (Laboratorio Longitudinal)	37
4.10. Potencia Instantánea y media local medidas y simuladas. (Laboratorio LOS)	39
4.11 Probabilidad acumulada de la potencia por encima de la media normalizada. (Laboratorio LOS)	40
4.12. Potencia Instantánea y media local medida y simulada. (Laboratorio NLOS/LOS)	42
4.13. Probabilidad acumulada de la potencia por encima de la media normalizada. (Laboratorio NLOS/LOS)	43
Tabla 4.1 Diferencia entre potencias medias	44
Tabla 4.2 Diferencia entre curvas de probabilidad acumulada (CDF)	44

# Capítulo 1

## Introducción y objetivos

### 1.1. Introducción

A lo largo de la evolución de las comunicaciones digitales, desde la red GSM (2G) hasta la actual LTE-Advanced (4G), la velocidad de las redes digitales ha tenido un gran crecimiento. A consecuencia de dicho crecimiento se han incrementado el número de conexiones de dispositivos y la demanda de datos por parte de la población. La tecnología 4G se verá incapaz en futuro de satisfacer las necesidades de alta velocidad y datos que se generarán. Por ello se está empezando a trabajar en el desarrollo de la tecnología 5G, que utilizará nuevas bandas de frecuencia para las redes de comunicaciones, las cuales dispondrán de un gran ancho de banda que podrá satisfacer las necesidades de capacidad y velocidad. Dichas bandas se estiman que serán cinco: a) La banda de 10Ghz, en la cual se centra el estudio de este TFG, b) la banda de 32 GHz (31,8 – 33,4 GHz), c) la banda de 40GHz (45,5-48,9 GHz) y d) la banda de 66 GHz (66-71 GHz) [1]. Agencias internacionales como la ITU (International Telecommunication Union) prevén que a partir del año 2020 se comience a desplegar dicha tecnología.

La tecnología 5G ofrecerá servicios avanzados, superando la simple conexión de usuarios a la red, llevando al Internet de las cosas (IoT), y a la conexión Máquina a Máquina (M2M) a convertirse en una realidad. A su vez se pretende con esta tecnología llegar a picos de velocidad de datos en torno a los 50Gbps en conexiones móviles superando ampliamente a las velocidades actuales de la 4G, de unos 1-3Gbps. También se prevé un mayor número de conexiones simultaneas pudiendo llegar al millón de conexiones por kilómetro cuadrado, una latencia mucho más baja que su predecesora, entorno a los 1-5 ms, frente a los 10-50ms actuales, y a su vez soportar una alta movilidad de los usuarios y una relación coste/eficiencia aceptable.

Para lograr dichos requerimientos se están desarrollando estudios de diferentes técnicas de transmisión. Debido a las frecuencias en las que se va a desarrollar la tecnología 5G, como la banda mmWave, técnicas como el MIMO masivo [2] están cobrando gran importancia ya que debido a las altas frecuencias en las que se transmitirá se pueden incorporar un gran número de antenas a los sistemas de transmisión y contribuirán a evitar las interferencias y las pérdidas de propagación propias en dichas frecuencias. Dependiendo del tipo de escenario en el que se realizarán las comunicaciones 5G las técnicas de transmisión se modificarán dependiendo de la distancia, las interferencias o el scattering del entorno. Mientras que en escenarios de exteriores con grandes distancias entre la estación base y los usuarios, los arrays de antenas tendrán que tener un tamaño entorno a las  $10\lambda$ , en los entornos de interior con pequeñas células, las comunicaciones podrán soportar arrays de muchas más antenas permitiendo técnicas como el beamforming o el MU-MIMO que permitirán una respuesta rápida y precisa del canal en el momento de la transmisión para, de esta manera, dedicar recursos diferentes a cada usuario y a su vez suplir los problemas de comunicación que supone el exceso de elementos dispersivos [3].

La caracterización del canal radio en la futura 5G resultará imprescindible para aplicar las técnicas de transmisión y lograr los requisitos que se exigirán en el estándar. Por ello

es necesario realizar proyectos y estudios de nuevos modelos de canal radio en las bandas susceptibles de ser usadas en esta tecnología.

## 1.2. Objetivos

Como contribución a la investigación del canal radio en una de las bandas propicias para las comunicaciones 5G como es la banda de 10GHz y debido a que las transmisiones en banda estrecha resultarán ser clave en dicha tecnología por las comunicaciones Máquina a Máquina y el Internet de las cosas [4], se ha propuesto un estudio de la caracterización del canal radio en banda estrecha en entornos de interior en un rango frecuencial de 9.5 a 10.5 GHz.

El objetivo del TFG consiste en obtener datos suficientes de las medidas realizadas entre dos antenas omnidireccionales en diferentes entornos de interior y en distintas trayectorias, situando las antenas en zonas de línea de visión directa y en otras en ausencia de ella (LOS/NLOS), abarcando así las posibles situaciones que se puedan dar en una comunicación inalámbrica. Con todo ello se pretende aportar más información a los estudios que se están llevando a cabo para el desarrollo del estándar de la quinta generación de comunicaciones móviles.

## 1.3. Organización de la memoria

La memoria se estructura en 5 capítulos. En el capítulo 2 se realiza una descripción de los conceptos teóricos utilizados en el TFG para llevar a cabo la caracterización del canal. En el capítulo 3 se realiza una descripción detallada del sistema de medida y el programa de simulación utilizados en la campaña de medidas. En el capítulo 4 se pasa a representar y describir las medidas obtenidas, su estadística y la comparación entre las medidas empíricas y simuladas. En el capítulo 5 se tratarán las conclusiones obtenidas y las posibles líneas de futuro de aplicación sobre el tema tratado.

## 1.4. Cronología de las tareas

La distribución de las tareas realizadas en el TFG ha sido la siguiente:

- a) *Documentación.* En esta primera etapa del proyecto se realizó la búsqueda de información relativa al proyecto, tanto en trabajos relacionados como en documentos científicos y académicos.
- b) *Puesta a punto del software.* En esta parte se estudió el funcionamiento del software usado para la realización de las medidas y se realizaron pequeñas correcciones para garantizar correcto funcionamiento.
- c) *Campaña de medidas.* En esta parte del proyecto se realizaron las medidas del canal radio con las que trabajaría posteriormente.
- d) *Procesado de las medidas.* Se añadieron funcionalidades al software original para obtener ciertos parámetros estadísticos que servirían para el estudio posterior del canal. Por otro lado, se obtuvieron los resultados de las simulaciones obtenidas en *CINDOOR*.

- e) *Segunda campaña de medidas.* Se observarán durante el procesado de las medidas ciertas anomalías en algunas de ellas por lo que hubo que repetir parte y posteriormente procesarlas con el software citado anteriormente.
- f) *Desarrollo de la memoria.* En esta etapa se redactó la memoria comentando lo relativo al estudio del canal radio, resultados y conclusiones.

# Capítulo 2

## Caracterización del canal radio en banda estrecha

### 2.1 Introducción

En un sistema de radiocomunicaciones, los efectos del multicamino inherentes al canal radio y asociados con los diferentes mecanismos de acople entre extremos transmisor y receptor tales como reflexión, difracción y dispersión de las ondas radioeléctricas en los diferentes obstáculos del escenario, provocan en el extremo receptor fluctuaciones en la envolvente y la fase de la señal recibida, dando lugar a lo que se conoce como desvanecimientos multicamino o desvanecimientos rápidos de la señal. En un sistema de transmisión de banda estrecha, estas variaciones de carácter aleatorio de la señal deben ser caracterizadas de forma estadística para analizar su influencia sobre el funcionamiento del propio sistema.

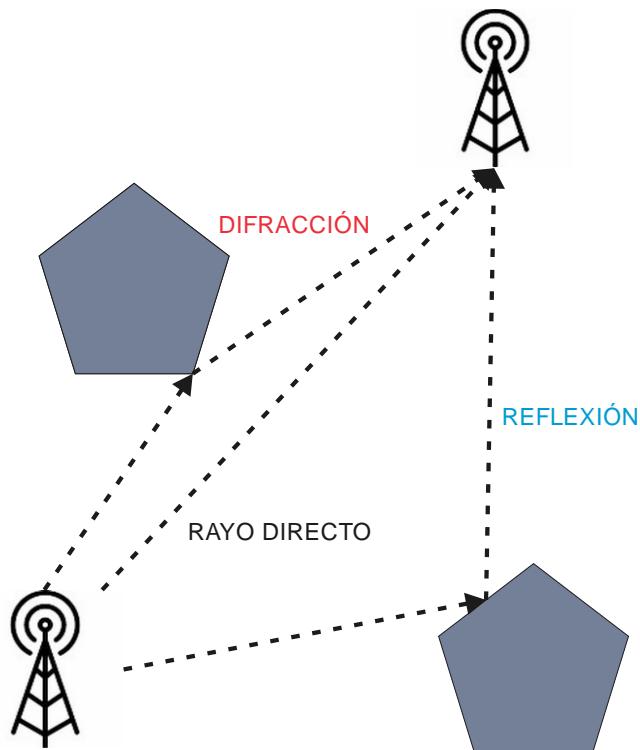
En definitiva, la caracterización del canal radio juega un papel determinante como paso previo al despliegue de los sistemas y como apoyo al desarrollo de los nuevos sistemas de comunicaciones móviles o vehiculares. En este sentido, este TFG se ha centrado en la caracterización del canal radio en banda estrecha en escenarios de interiores en la banda de 10 GHz, contemplando diferentes situaciones, de visión directa (LOS, *Line Of Sight*), LOS-NLOS (*LOS-Non Line Of Sight*) y en escenarios más o menos complejos en cuanto a los obstáculos del entorno (espacios amplios con columnas y puertas metálicas, o cerrados con gran cantidad de material de oficina). A estas frecuencias de trabajo, y tanto más cuanto más se suba en frecuencia, los resultados del análisis del canal radio exhibirán una gran dependencia del sistema de medida, de la precisión de las medidas, y, si se utilizan herramientas software de simulación del canal radio, también deberá cuidarse el modelado geométrico del escenario y considerar los tipos de materiales que lo integran. En este capítulo se introducen los conceptos básicos sobre la propagación multicamino y una aproximación al modelado matemático de la señal y del canal, para, a continuación, introducir los parámetros con los que abordar la caracterización estadística del canal en banda estrecha, así como las distribuciones de probabilidad más comúnmente utilizadas y aceptadas en la literatura.

### 2.2 Propagación multicamino

Tomando como referencia un sistema de radiocomunicaciones punto a zona como sería el caso de los sistemas de comunicaciones móviles en los que se centra este TFG, la propagación multicamino se produce por la interacción de las ondas con los obstáculos presentes en el entorno de propagación de los receptores, así como por el propio movimiento relativo entre antenas. En consecuencia, la señal transmitida sufrirá, con pequeños cambios de posición del receptor, alteraciones en la amplitud y la fase debido a la superposición en el receptor de las diferentes componentes de señal reflejadas,

difractadas o dispersadas que llegan a éste con diferentes retardos y amplitudes, y que dan lugar a interferencias constructivas y destructivas entre aquellas según el resultado de la suma fasorial de todas ellas [5].

Los principales mecanismos de acople de la señal entre antenas se muestran en la Figura 2.1. Además de la contribución dominante del rayo directo en las situaciones LOS y NLOS en aquellos casos en los que los materiales no atenúen lo suficiente la señal, las contribuciones de las reflexiones de primer orden y superiores pueden tener una influencia determinante en las variaciones que exhiba la envolvente de la señal. Otros mecanismos de acople como las difracciones en aristas o la dispersión o scattering en objetos del entorno pueden revelarse como las principales contribuciones a la potencia en el receptor en escenarios urbanos y de interiores en situaciones NLOS. La influencia y las consideraciones que deben hacerse de estos mecanismos de propagación dependen también de la banda de frecuencias y con ello del tamaño eléctrico de los obstáculos y dispersores que nos encontramos en el escenario bajo estudio.



**Figura 2.1.** Ejemplo gráfico de la propagación multicamino.

Si analizamos el efecto del multicamino en la señal transmitida en el dominio del tiempo, se observa que al receptor llegan las distintas componentes de la señal con distintos retardos, provocando el ensanchamiento temporal de la señal transmitida, dando lugar a lo que se conoce como *dispersión temporal del canal radio*. Para caracterizar la dispersión temporal del canal, la cual puede desembocar en la aparición de Interferencia entre Símbolos (ISI) dependiendo de las características del sistema de radiocomunicaciones al que se aplique el estudio (su velocidad de transmisión y el ancho de banda del sistema), puede recurrirse al perfil potencia-retardo o al estudio de la función de coherencia del canal. En el primero de los casos, a partir del perfil potencia-retardo se

puede obtener una estimación punto a punto de la variación de densidad de potencia en función del retardo con el que llega cada eco o contribución del multicamino, estimando con parámetros como el retardo cuadrático medio la dispersión temporal del canal. En el dominio de la frecuencia se puede recurrir a evaluar la función de coherencia del canal, esto es el grado de correlación de la respuesta del canal en función de la separación en frecuencia. En este caso, magnitudes como el ancho de banda de coherencia del canal para un cierto umbral de correlación nos pueden ayudar a analizar si el canal es plano o, por el contrario, si introduce una distorsión o selectividad en frecuencia para el caso que nos ocupa.

## 2.3 Modelado de la señal en un entorno multicamino

Para analizar matemáticamente el proceso que afecta a una señal por el efecto del multicamino, se parte del equivalente paso-bajo de la señal a transmitir,  $s(t)$  [6],

$$s(t) = \operatorname{Re}\{S_p e^{j2\pi f_c t}\} \quad (2.1)$$

donde  $S_p$  es la envolvente compleja y  $f_c$  es la frecuencia de la portadora.

Suponiendo un canal estacionario y que los diferentes ecos de la señal transmitida llegan al receptor con amplitudes y retardos distintos, se puede expresar la señal recibida  $y(t)$  de la siguiente forma

$$y(t) = \sum_{i=1}^N a_i s(t - t_i) \quad (2.2)$$

siendo  $N$  el número de contribuciones del multicamino que llegan al receptor,  $a_i$  la componente compleja de modulo y fase, y  $t_i$  el retardo de cada componente de la señal. Combinando (2.1) y (2.2), la señal recibida puede expresarse como:

$$y(t) = \sum_{i=1}^N A_i e^{-j2\pi f_c \tau_i} e^{j2\pi f_c t} \quad (2.3)$$

Donde, para cada componente del multicamino  $A_i$  es la amplitud y  $e^{-j2\pi f_c \tau_i}$  el desfase debido al retardo de propagación.

En el canal radio móvil, la propagación multicamino y el movimiento relativo entre las antenas transmisora y receptora provocan la variación temporal de la señal recibida, de tal forma que la señal paso banda recibida puede expresarse como:

$$y(t) = \operatorname{Re} \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{a=1}^{\infty} a_{i,k} S_p (t - \tau_i) e^{j2\pi(f_c + f_d \cos(\theta_{i,k}))t + \phi_{i,k}} \right\} \quad (2.4)$$

siendo  $a_{i,k}$  y  $\phi_{i,k}$  la amplitud y la fase de las contribuciones i-ésimas de las componentes de la señal recibida con un ángulo  $\theta_{i,k}$  con respecto a la dirección de transmisión,  $\tau_i$  el retardo de cada contribución y  $f_d$  la frecuencia Doppler, dependiente de la velocidad de transmisión,  $v$ , y de la longitud de onda asociada,  $\lambda_c$ , a la frecuencia de la portadora, siendo esta relación tal que  $f_d = v/\lambda_c$ .

Suponiendo el equivalente paso bajo del canal con una respuesta impulsiva  $h(t, \tau)$  en un instante  $t$  a un impulso generado tras  $\tau$  segundos, y el coeficiente complejo asociado al retardo  $\tau_i$ , tal que

$$h(t, \tau) = \sum_{i=0}^{\infty} a_i \delta(t - t_i) \quad (2.5)$$

$$h(t, \tau_i) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k e^{j2\pi(f_c + f_d \cos(\theta_{i,k}))t + \phi_{i,k}} \quad (2.6)$$

obtenemos la expresión para la señal recibida como la convolución de la señal equivalente paso bajo transmitida y la respuesta impulsiva del canal como:

$$y(t) = Re\{[h(t, \tau_i) \otimes S_p(t)]\} e^{j2\pi f_c t} \quad (2.7)$$

## 2.4 Estadísticas del canal en banda estrecha

En el desplazamiento de un receptor a lo largo de una trayectoria sobre un escenario de interiores o exteriores, la señal puede experimentar dos tipos de desvanecimientos o atenuaciones [7], el *desvanecimiento rápido o de pequeña escala*, producido por los obstáculos y dispersores que encuentra la señal a su paso, y que puede provocar cambios bruscos en el nivel de señal con pequeños cambios de posición relativa entre extremos de la comunicación; y el *desvanecimiento lento o a gran escala* que es el producido por la variación de posición de la antena durante la transmisión combinado con cambios sustanciales en las condiciones/escenario de propagación (cambio de calles, transición entre zonas LOS y NLOS, etc.) y su influencia se puede medir a través de la potencia media de la señal, asociado con el promediado de la señal en un área local y analizando las variaciones de esas medias locales.

### 2.4.1 Media de la potencia

Para estimar la media local de la potencia recibida se usa el denominado método de la ventana deslizante [8]. Dicho método se basa en estimar la potencia local en cada punto de la trayectoria de interés,  $x_i$ , como promedio de la potencia instantánea entre los  $N$  puntos que componen la ventana de longitud  $L$ . En general, la potencia media se podría expresar de la siguiente manera:

$$m(x_i) = \frac{1}{L} \int_{x_i-L/2}^{x_i+L/2} s(x) dx \quad (2.8)$$

siendo  $s(x)$  la señal recibida, suma de todas las componentes multicamino, y  $m(x_i)$  la potencia local para cada punto  $x_i$ . Se ha de elegir un tamaño de la ventana  $L$  adecuado (valores comúnmente aceptados oscilan entre 8 y 30 longitudes de onda, siendo los valores más pequeños los utilizados en escenarios de interiores), por lo que si se escoge

una demasiado grande se suavizarían los desvanecimientos a gran escala y si se elige una demasiado pequeña los desvanecimientos a pequeña escala no se percibirán.

#### 2.4.2 Estadísticas de la envolvente

Analizando la literatura existente y observando otros experimentos de medida en interiores llevadas a cabo por otros autores [9], se llega a la conclusión de que las distribuciones de probabilidad típicamente utilizadas para caracterizar las variaciones de la amplitud de la envolvente de la señal son las de *Rice* y *Rayleigh*, debido a que éstas se ajustan mejor a las descripciones de los desvanecimientos en pequeña escala tanto de manera teórica como ocasionalmente de forma empírica.

Dado que la distribución Rayleigh es un caso particular de la de Rice, se ha optado por elegir esta última como modelo a describir. A su vez, la herramienta CINDOOR que se utilizará en las comparativas en este TFG, incluye entre sus salidas gráficas una función de probabilidad acumulada de la simulación junto a la teórica de Rice que mejor la ajusta, y que se utilizará para analizar teóricamente los entornos de interior medidos.

La distribución de Rice es la que mejor describe aquellas situaciones en las que al receptor llega una componente de señal del multicamino dominante con respecto al resto. Cuando existe una componente dominante la señal recibida puede descomponerse en la suma de dos vectores, el primero, un vector Rayleigh con una amplitud y fase aleatorias asociado a las componentes más atenuadas y otro con una amplitud y fase determinista asociado a la componente dominante. La fase del fasor presenta una distribución uniforme en el intervalo  $[0, 2\pi)$ , mientras que la amplitud  $r$  sigue una distribución de Rice expresada mediante la siguiente función de densidad de probabilidad:

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{\frac{r^2+\nu^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{r\nu}{2\sigma^2}\right) \quad r \geq 0 \quad (2.9)$$

siendo  $I_0$  la función de Bessel de orden cero,  $\nu$  la magnitud del rayo o componente dominante y  $\sigma^2$  es proporcional a la potencia de la componente Rayleigh.

La distribución de Rayleigh, como caso particular de Rice, se suele expresar con frecuencia en función del llamado parámetro  $K$  de la distribución de Rice, siendo éste el cociente que representa la relación entre la potencia asociada a la componente dominante del multicamino y la potencia del resto de contribuciones, tal que  $K = \nu/2\sigma^2$ . De esta forma, la función de densidad de probabilidad de Rice queda tal cual se expresa en (2.10).

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\left(\frac{r^2}{2\sigma^2}+K\right)} I_0\left(\frac{r}{\sigma} \sqrt{\frac{K}{2}}\right) \quad (2.10)$$

El caso particular de la distribución Rayleigh se da cuando no existe un rayo directo dominante, por lo que el parámetro  $K$  tiene valor cero.

# **Capítulo 3**

## **Sistema de medida y entorno de simulación**

### **3.1 Introducción**

En este capítulo se describirán de manera detallada las características del sistema de medida, sus componentes y las aplicaciones software utilizadas.

Se ha partido de un sistema de medida utilizado en un principio para medidas de campo lejano y cercano dentro de una cámara anecoica. En este TFG se empleó para realizar medidas de canal en banda estrecha a altas frecuencias en entornos de interior, por lo que se han realizado ciertas modificaciones para adaptarlo a las necesidades del proyecto.

El sistema de medida consta principalmente de dos partes, la primera se trata de un posicionador con dos controladores que mueven, a partir de un motor y un reductor, dos ejes (vertical y horizontal) de sendas unidades lineales; sobre una de las cuales va sujetada a un mástil la antena receptora que recibe señales de otra antena conectada al transmisor y situada en un emplazamiento fijo. La segunda parte la forma la aplicación software que controla el movimiento de la unidad lineal y procesa las medidas llevadas a cabo con un analizador de redes.

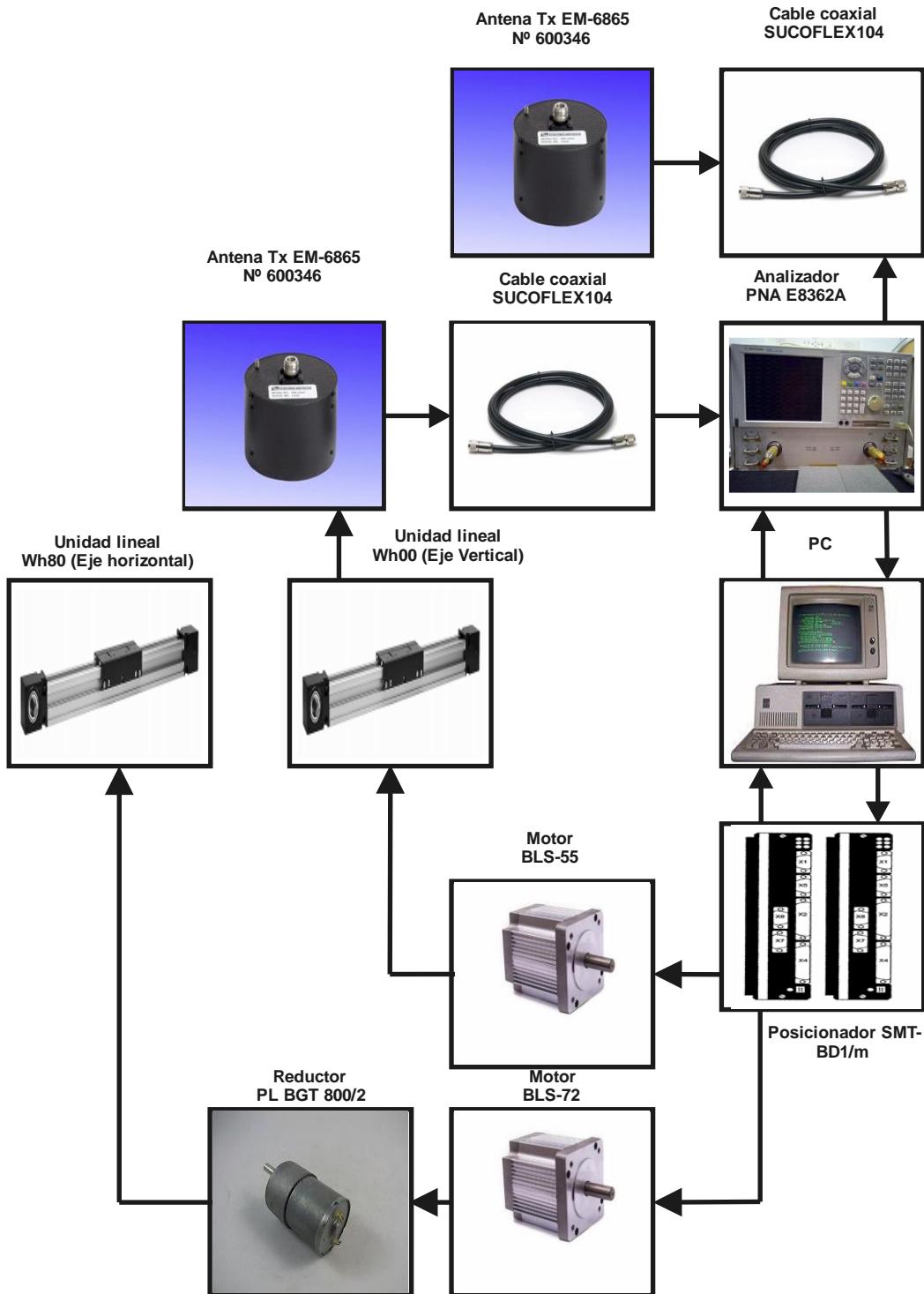
De forma complementaria, partiendo de un TFG con una proyección paralela a éste, se han utilizado las medidas de canal en un entorno simulado similar al escenario real de medida para realizar comparaciones entre los resultados obtenidos con el sistema y las medidas teóricas del simulador.

En lo que a la estructura del capítulo se refiere, en la siguiente sección se incluye un diagrama de bloques del sistema de medida con el fin de dar una visión global del mismo, para luego describir los componentes que lo integran de manera más detallada. En la segunda parte del capítulo se procederá a explicar el funcionamiento de la aplicación software y el entorno de simulación utilizado en este proyecto.

Al final del capítulo se indicarán las modificaciones y complementos añadidos del sistema de medida y de la aplicación software.

### **3.2 Sistema de medida del canal radio**

La configuración del sistema de medida se puede describir mediante el diagrama de bloques de la Figura 3.1. En los siguientes subapartados se resumen los principales bloques del sistema de medida.

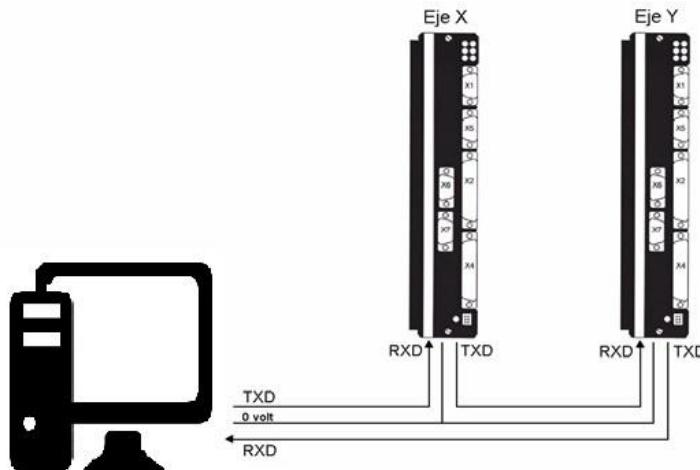


**Figura 3.1** Diagrama de bloques del sistema de medida.

### 3.2.1. Posicionador SMT-BD1/m

El controlador de posición, fabricado por la empresa *Infranor* [10], es el que ha sido utilizado para controlar el movimiento lineal de la antena y que es controlado a su vez de forma remota a través de un puerto serie RS232. Las medidas están realizadas a partir del

escáner plano formado por dos ejes, uno horizontal y otro vertical montado sobre el primero, (ejes X-Y), de tal manera que el sistema lo integran dos controladores de este tipo, uno para controlar cada eje del barrido plano y conectados en anillo, tal y como se muestra en la Figura 3.2.



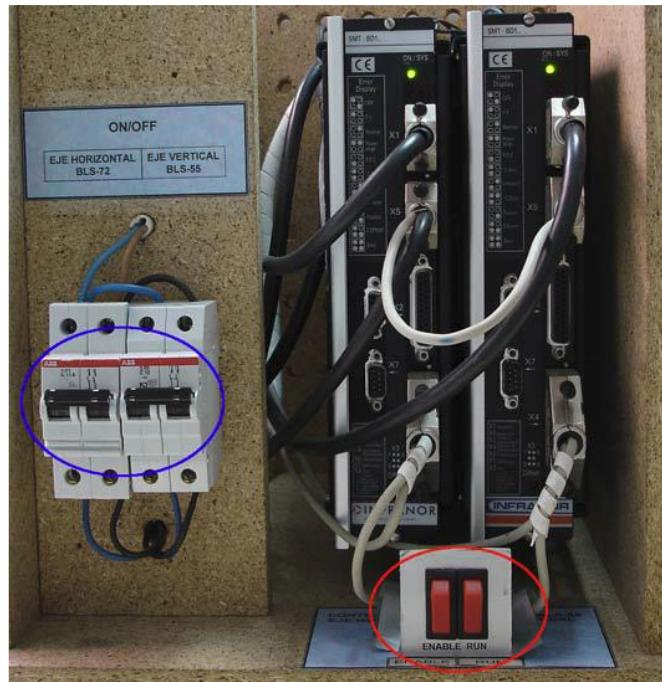
**Figura 3.2** Estructura en anillo de los controladores.

Para comunicarse con los controladores se han de usar una serie de comandos en caracteres ASCII junto con ciertos parámetros adicionales para indicar órdenes de movimiento, parada, estado del controlador, etc.

El recorrido de los ejes es de 1380 y 810 mm para los ejes horizontal y vertical, respectivamente. Hay colocados dos interruptores de fin de carrera en los extremos de los raíles para evitar que los ejes sobrepasen el límite establecido; y una vez el interruptor es pulsado se envía un comando a los controladores que paran el motor.

Los controladores ofrecen una resolución máxima entorno a los micrómetros, aunque están configurados internamente para ofrecer una resolución de unas décimas de milímetro.

Para la activación de los controladores se han conectado a ellos dos interruptores magnetotérmicos para la alimentación de los mismos pudiendo, una vez activados, enviar comandos y recibir respuestas, pero para mover los ejes es necesario activar también los interruptores de ENABLE y RUN, que activan el motor, mostrados en la Figura 3.3.



**Figura 3.3** Detalle de los controladores SMT BD/1 y alimentación asociada.

### 3.2.2. Antenas

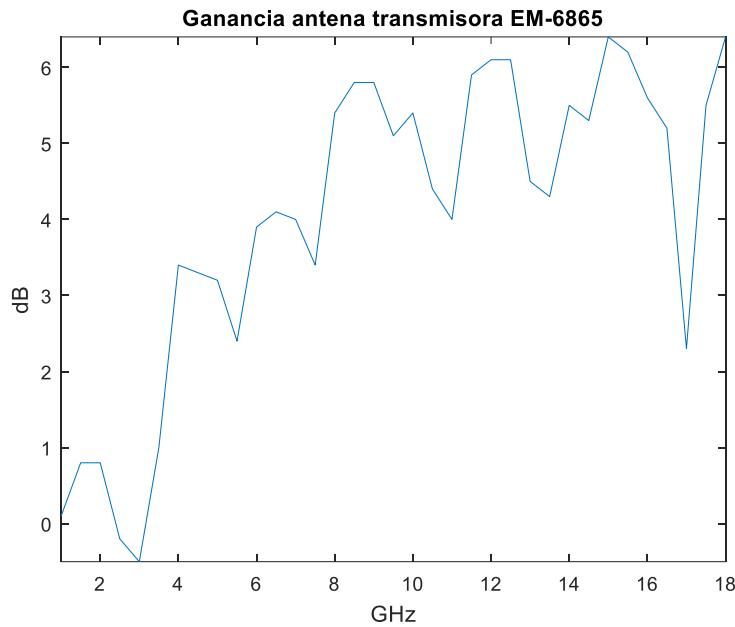
Se han utilizado en este sistema de medida dos antenas omnidireccionales biconicas de banda ancha modelo EM-6865, como la que se muestra como ejemplo en la Figura 3.4.



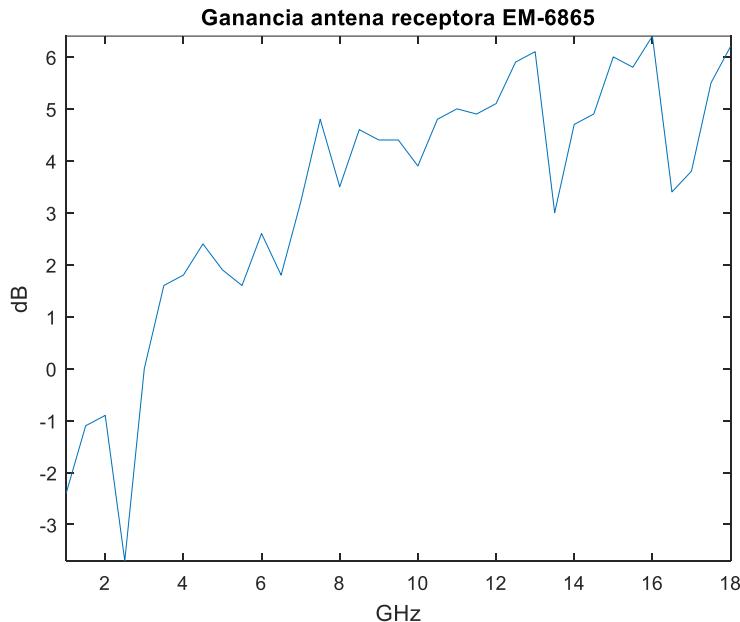
**Figura 3.4** Antena EM-6865

Son antenas de polarización vertical con un rango de frecuencias de operación comprendido entre 1 y 18 GHz. Tienen un patrón de radiación omnidireccional y una respuesta en frecuencia plana. Físicamente, la antena se compone de dos elementos biconicos conectados punto a punto. El conductor central de un coaxial rígido se conecta al cono superior y el blindaje al cono inferior. Como terminación de la antena se dispone un conector tipo N-hembra y un radomo en forma de tubo, que actúa como protección frente a agentes externos.

En la Figura 3.5 y 3.6 se muestra la ganancia de ambas antenas, receptora y transmisora, en función de la frecuencia.



**Figura 3.5.** Ganancia antena transmisora EM-6865.



**Figura 3.6** Ganancia antena receptora EM-6865.

### 3.2.3. Unidades lineales WH80 y WH00

Se han utilizado estas unidades lineales para realizar desplazamientos de la antena receptora a través de dos ejes. La unidad lineal *WH80* ha sido colocada en horizontal para desplazar la antena en el eje X con un recorrido máximo de 1380 mm. La unidad lineal *WH00*, anclada en vertical sobre la anterior, se desplaza en el eje Y con un recorrido de 810 mm.

La transmisión de la correa está formada por cables de acero altamente resistentes al desgaste y su guía de ruedas permite movimientos rápidos y altos esfuerzos y momentos. En la Figura 3.7 se muestra un detalle de las unidades lineales de la serie WH de Tecnopolwer S.L.



**Figura 3.7** Unidad lineal WH.

### 3.2.4. Motores BLS-72 y BLS-55

Estos motores [11] son los encargados de realizar el movimiento de la antena receptora. Estos a su vez son gobernados por un controlador cada uno conectado por el puerto serie a un PC. El motor BLS-55 es el encargado de mover el eje vertical mientras que el BLS-72 mueve el horizontal. En la Figura 3.8 se muestra un motor de la serie BLS de Infranor S.A. con detalle de las conexiones de alimentación y resolver de posición.



**Figura 3.8** Detalle del motor de la serie BLS

Debido a su estructura y diseño, estos motores son capaces de soportar sobrecargas de 4 veces su valor nominal, pudiendo conseguir aceleraciones muy elevadas. Ambos motores poseen sensores que detectan calentamientos debidos a un sobreesfuerzo del motor que obligan a pararlos y a solucionar el problema.

Los motores disponen de dos conectores en su parte superior, correspondiendo uno a las bobinas del motor y el otro conecta la manguera del captador resolver. El resolver del motor proporciona información sobre la posición del eje, sentido de giro, velocidad y temperatura del motor.

Si el sistema de medida diseñado impacta contra uno de los extremos de la unidad lineal, el rotor queda bloqueado y se puede originar una sobrecarga que puede llegar a dañar al motor. Para evitar esta situación, se emplazan en ambos extremos de las unidades lineales sendos finales de carrera, basados en dos interruptores pasivos que por presión detectan la llegada del carro móvil al extremo de la unidad lineal e inhiben el motor.

Aunque presentan un aspecto y unas especificaciones parecidas, el BLS-55 presenta una resistencia térmica y una velocidad algo mayores que el BLS-72.

### 3.2.5. Reductor PL.BGT 800/2

El reductor [12] permite efectuar desplazamientos de la unidad lineal con mucha precisión. Su propósito consiste en reducir la velocidad de giro del eje del motor. Sólo se ha utilizado un reductor en el eje horizontal, cuyo detalle se muestra en la Figura 3.9.



**Figura 3.9** Reductor PL.BGT 800/2.

### 3.2.6. Analizador de redes

En este proyecto se ha usado el analizador de redes *PNA E8362A* de *Agilent Technologies* (*Keysight Technologies* en la actualidad) como equipo de medida. Se realizaron medidas en transmisión, en el rango de frecuencias de interés del parámetro S21. El equipo se comunicará con las demás aplicaciones del ordenador mediante el puerto GPIB.



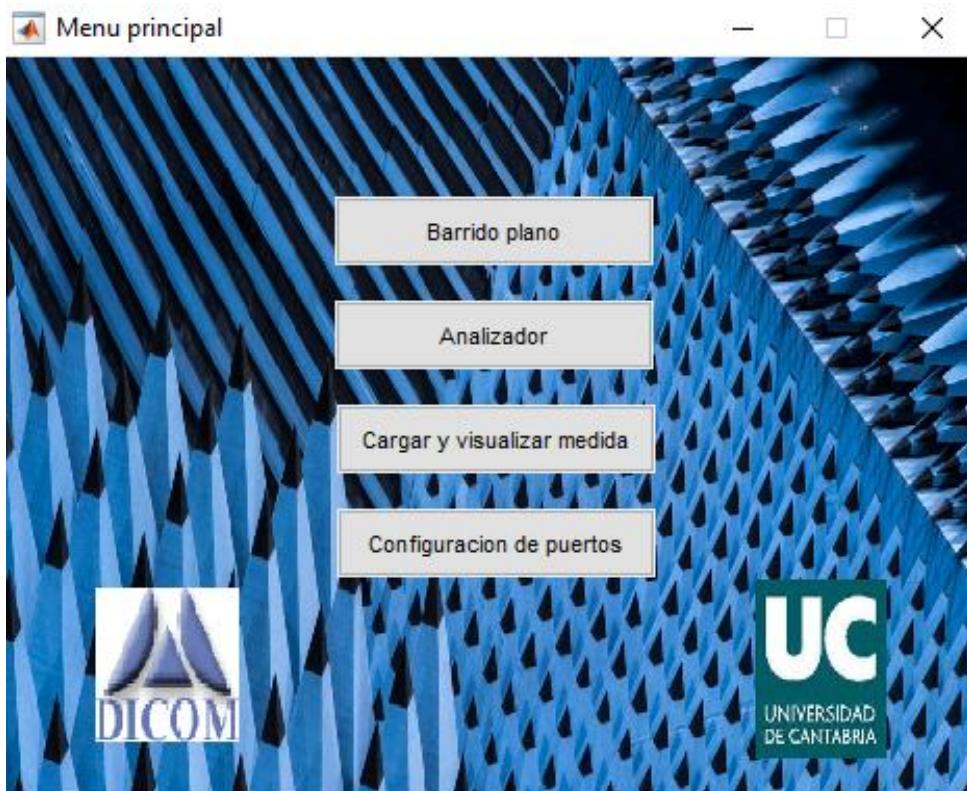
**Figura 3.10** Analizador de redes PNA E8362A.

### 3.3 Descripción de la aplicación software

Para manejar el posicionador y procesar las medidas se ha usado el programa SIMBA, desarrollado en el marco de otro Trabajo de Fin de Carrera. [13] Dicho programa ha sido diseñado en Matlab y mediante su entorno gráfico propio (GUIDE) se crean las ventanas desde donde se puede controlar con facilidad el sistema de medida.

Cada programa de la aplicación está formado por dos archivos, uno con extensión *.m*, propia de Matlab, que es el que contiene el código de las funciones a ejecutar, y otro *.fig* que forma el entorno gráfico del programa. Para iniciar el programa se ejecutará el archivo *iniciar.m* que abrirá una ventana de bienvenida y arrancará el menú de inicio como se muestra en la Figura 3.11. Aunque en un principio la aplicación contenía varios programas para ejecutar diferentes tipos de barridos, en este proyecto solo se usarán los necesarios para hacer el barrido plano, siendo éstos los siguientes:

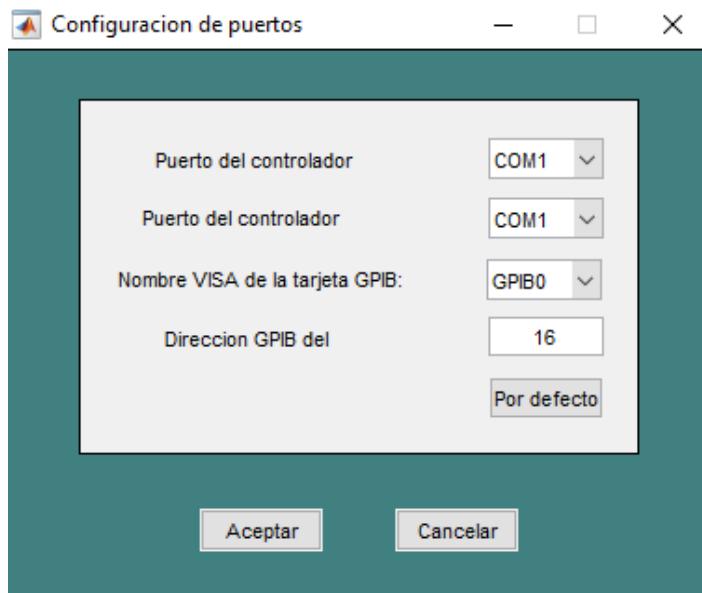
- Barrido plano: configura los parámetros del barrido en los ejes X e Y y del analizador para tomar las medidas.
- Analizador: configura el analizador.
- Cargar y visualizar medidas: muestra las medidas realizadas por los programas anteriores.
- Configuración de puertos: selecciona los puertos y las direcciones para realizar la comunicación con los brazos mecánicos y el analizador.



**Figura 3.11** Ventana con menú principal de acceso a funciones de configuración, medidas y representación de resultados.

### 3.3.1. Configuración de puertos

En la Figura 3.12 se muestra la pantalla de configuración de los puertos de conexión de posicionadores y equipo de medida al PC. Los puertos serie que se usaron para conectar el ordenador son el COM1 y el COM2, la dirección de la tarjeta GPIB utilizada es la número 16 y el nombre VISA de la tarjeta es el ‘GPIB0’.



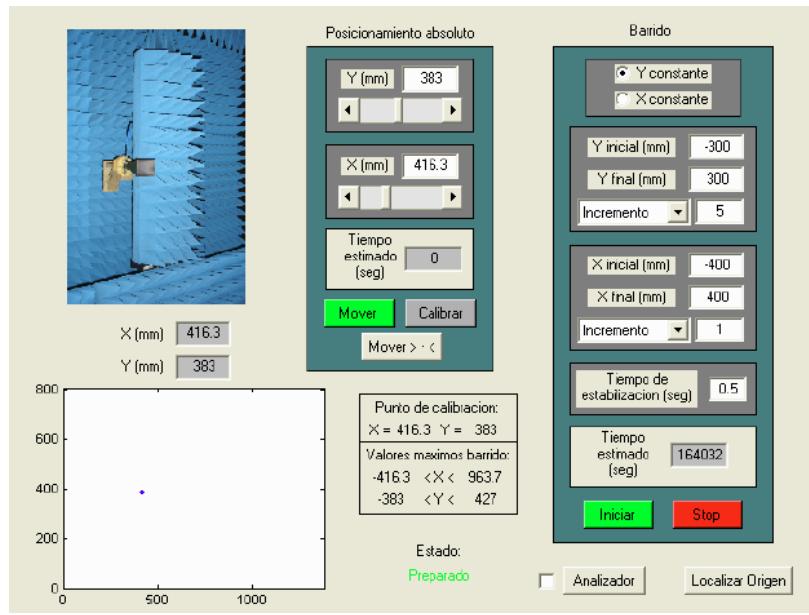
**Figura 3.12** Ventana de configuración de la conectividad de controladores de posición y equipo de medida.

### 3.3.2. Barrido plano

Para ejecutar este programa es preciso pulsar el botón ‘*Barrido plano*’ del menú principal, accediendo a la interfaz gráfica que se muestra en la Figura 3.13 y que da acceso a las funciones de configuración del movimiento sobre la geometría plana.

El posicionamiento absoluto permite realizar movimientos simples con los ejes y situar el origen relativo. También permite situar el punto de calibración para el barrido pulsando el botón ‘*Calibrar*’.

El cálculo del tiempo estimado del movimiento solicitado en el programa se calcula teniendo en cuenta que los ejes se mueven de manera secuencial, siendo la velocidad máxima del eje X de 5 mm/sg y 1.2 mm/sg la del eje Y; con unos tiempos de aceleración/deceleración son de 4 segundos.



**Figura 3.13** Ventana principal para la gestión del barrido plano, con acceso a funciones de posicionamiento manual de antena y de configuración del barrido.

Pese a que la posición absoluta permite un movimiento de hasta 1380 mm (eje X) y 810 mm (eje Y), las distancias que se muestran al usuario del programa no se corresponden con las que envía y recibe el controlador, existe un desfase entre ambas que el programa es capaz de calcular y manejar, correspondiendo el inicio en 0mm que vería el usuario con una distancia determinada ‘x’ por el programa que podrá ser positiva o negativa. Si existe un movimiento de 100mm indicado por el usuario, el programa sumará ‘x’ a esa distancia. Este proceso no es percibido por el usuario. Con el botón ‘Localizar origen’ el programa calcula ese desfase enviando a los ejes a los extremos inferiores hasta que se pulsan los interruptores de final de carrera. Una vez detenido el motor, el controlador envía el comando *PF* para que devuelva la posición en la que se encuentran los orígenes, dicha posición se guardará en un archivo de texto *posición\_origen.txt*. En el panel de visualización se muestra el punto de calibración, a partir del cual se obtiene el recorrido máximo del barrido. El último punto de calibración seleccionado es guardado por el programa en un archivo de texto *punto\_calibracion.txt* para que esté disponible en la próxima ejecución del programa.

Los movimientos del barrido plano se realizan con aceleraciones y deceleraciones constantes, las vibraciones del barrido son pequeñas y se fija un tiempo de estabilización adecuado de unos 0.5 segundos por movimiento.

En la Figura 3.13 también se encuentran los parámetros configurables para realizar el barrido y tras configurar dichos parámetros se puede comenzar a realizar las medidas pulsando el botón ‘Iniciar’. En ese momento, el programa realizará un chequeo comprobando si los interruptores ENABLE y RUN están activos y, en ese caso, se lanzará la medida, pero en caso contrario se cancelará, apareciendo un mensaje de notificación en la pantalla.

Con cada punto de medida alcanzado el programa refrescará la gráfica que aparece en la figura. Al iniciar el barrido se crearán dos archivos *características\_medida.out* y *comentarios.out*.

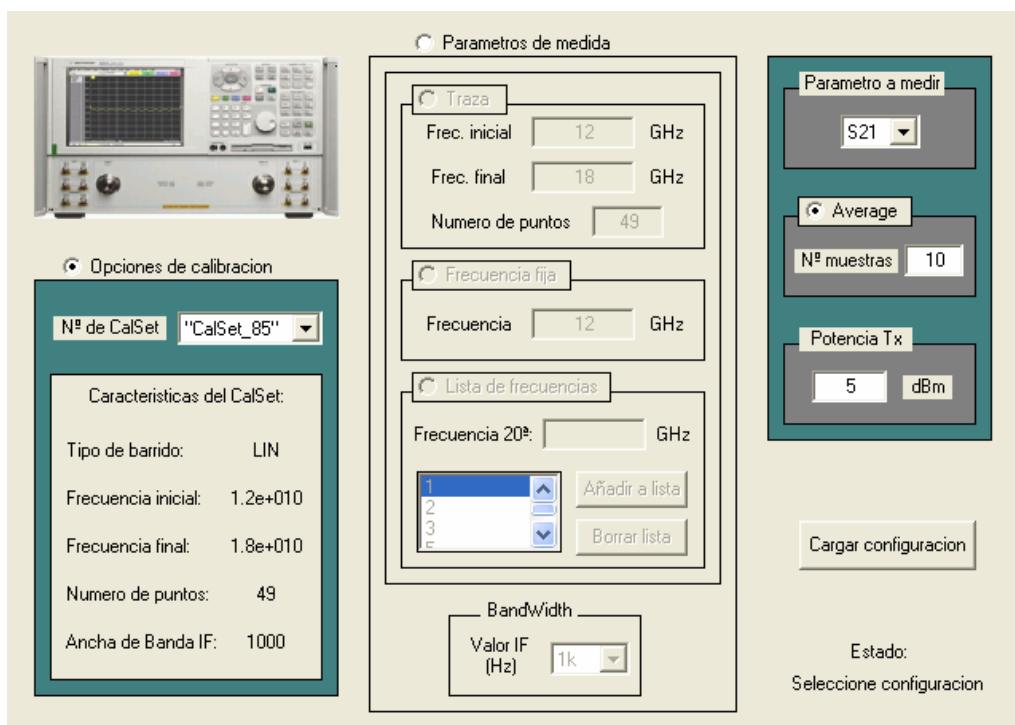
### 3.3.3. Analizador

Para la realización de las medidas se accede al analizador de redes pulsando el botón ‘Analizador’ en la ventana de características del barrido del programa SIMBA accediendo así a la pantalla de configuración de la medida que se muestra en la Figura 3.14.

El programa da la opción de elegir entre dos modos de configuración, o bien obtenemos los parámetros de calibración definidos (Calset) en la lista que aparece en la memoria del analizador dentro del apartado *Opciones de calibración*, o configuramos manualmente las características de la medida en la opción *Parámetros de medida*.

En las medidas realizadas en este TFG, una vez calibrado manualmente el analizador entre los extremos de los cables utilizados en transmisión y recepción, elegimos el calset asociado a dicha calibración, por lo que no se utilizó el apartado *Parámetros de medida*. El tercer panel que aparece en la ventana nos permite seleccionar el parámetro de scattering a medir (S11, S12, S21, S22). También podremos seleccionar el número de muestras promedio para realizar la medida y la potencia de transmisión (entre -27dBm y 20dBm).

Cuando ya se tiene configurado el analizador se pulsa el botón *Cargar configuración* trasladando todos los parámetros indicados al analizador. A continuación, se realizará la medida creándose los archivos *características\_medida.out* y *comentarios.out*.



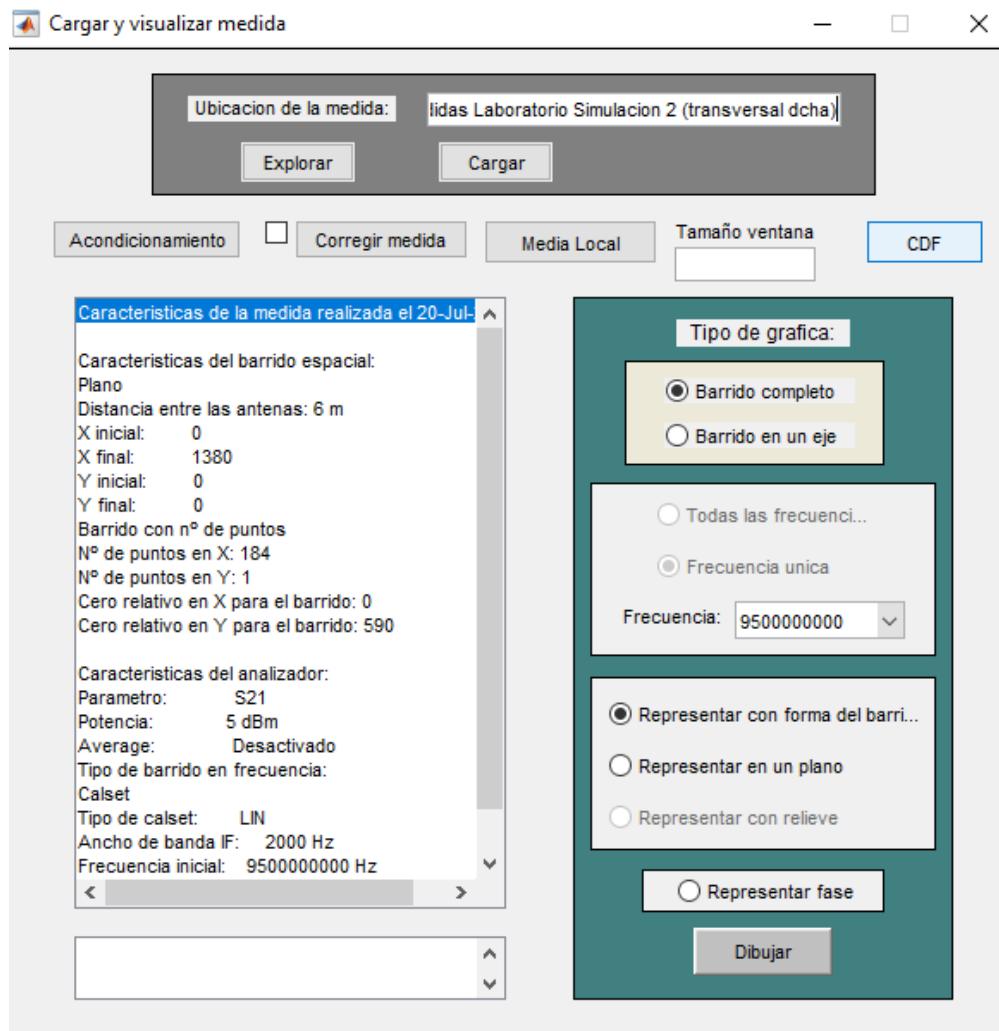
**Figura 3.14** Ventana de acceso a la configuración de los parámetros de medida con el analizador de redes.

### 3.3.4. Cargar y visualizar medidas

Éste es otro de los programas utilizados e integrado dentro de la misma aplicación global, dedicado en este caso a la visualización de las medidas realizadas.

Desde la interfaz gráfica asociada que se muestra en la Figura 3.15, se permite seleccionar el directorio donde se encuentran los archivos de las medidas realizadas mediante el botón ‘Explorar’. Una vez seleccionado el fichero de las medidas se leen los archivos *características\_medida.out* y *comentarios.out*.

Al cargarse los archivos aparecerán dos cuadros, el primero con las características de la medida y el segundo con los comentarios introducidos, si es el caso, por el usuario. Si no se encuentran los archivos en la ubicación indicada y se intenta cargar aparecerá un mensaje de error.



**Figura 3.15** Ventana principal de Cargar y visualizar medida.

Una vez cargadas las medidas, se activan las opciones de visualización de medidas. Dependiendo del tipo de medida ofrecerá unas opciones u otras. Para una medida simple obtendremos una gráfica que nos mostrará la frecuencia y el nivel de señal, mientras que, para un barrido, en este caso el barrido plano, podremos optar a gráficas que muestren el barrido completo en los dos ejes o un barrido simple eligiendo uno de ellos.

Con el barrido completo activado se pueden realizar varios tipos de visualizaciones:

- Representar el barrido plano con un código de colores que indica el nivel de señal.
- Representar una sola frecuencia del barrido indicando el nivel de señal en una gráfica y el recorrido de la antena en el barrido.
- Representar el barrido con los dos ejes, pudiendo mostrar el nivel de señal en relieve o con un código de colores plano.

Pulsando el botón ‘*Dibujar*’ el programa lee los archivos de la medida para luego mostrar la gráfica correspondiente según la selección del usuario. Cada vez que se pulse el botón se abrirá una nueva ventana con el fin de poder comparar diferentes gráficas de resultados.

### 3.4 Simulación del canal radio: CINDOOR

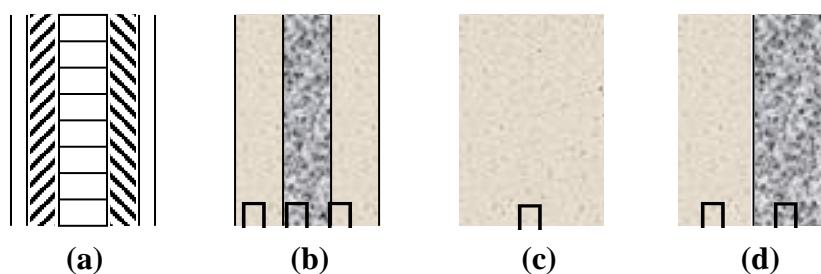
El programa CINDOOR fue desarrollado por el grupo GISAR (Grupo de Ingeniería de Sistemas, Antenas y Radiopropagación) del Departamento de Ingeniería de Comunicaciones de la Universidad de Cantabria. Permite caracterizar el canal radio en escenarios de interiores o exteriores y es una herramienta de apoyo útil para planificar e implementar sistemas de comunicaciones inalámbricas en entornos cerrados.

El programa ofrece como salidas de interés, entre otros, mapas de cobertura del sistema, estadística de los desvanecimientos, y otros parámetros como la dispersión del retardo y el ancho de banda de coherencia, todos ellos de gran importancia al analizar la influencia del canal radio en la planificación de un sistema de radiocomunicación.

CINDOOR se basa en modelos de propagación específicos basados en las técnicas del trazado de rayos, óptica geométrica y la Teoría Uniforme de la Difracción.

#### 3.4.1. Modelado geométrico y electromagnético del entorno

En CINDOOR, el modelado geométrico y electromagnético de un escenario está basado en el uso de placas planas, aproximación bastante aceptada por representar adecuadamente a los principales dispersores que nos podemos encontrar en el canal radio, tanto de interiores como de exteriores. Las características de dichas placas se han simplificado de manera que las placas planas pueden ser de varios tipos: Estructura original no homogénea, estructura multicapa, estructura simple no homogénea e interfaz entre dos medios ilimitados, tal y como se muestra en la Figura 3.16.



**Figura 3.16** Caracterización electromagnética de las paredes. (a) Estructura original no homogénea. (b) Estructura multicapa. (c) Estructura con capa simple homogénea. (d) Interfaz entre dos medios ilimitados.

### 3.4.2 Modelos de propagación en CINDOOR

CINDOOR se basa en una aproximación de alta frecuencia en la que el campo electromagnético se puede modelar mediante rayos, cada uno lleva asociado un frente de ondas, un valor vectorial de campo y una fase.

Conocido el campo electromagnético en un punto  $P_i$ , se puede calcular el campo en otro punto  $P_s$  mediante la expresión

$$\bar{E}(P_s) = \bar{E}(P_i)A(s)e^{-jks} \quad (3.1)$$

siendo  $s$  la distancia entre  $P_i$  y  $P_s$ , y  $e^{-jks}$  la variación de fase que sufre el campo entre ambos puntos y  $A(s)$  la amplitud que indica la perdida de potencia de la señal al propagarse.

Cuando entre los puntos  $P_i$  y  $P_s$ , el rayo choca contra una placa, el campo sufre una atenuación que se refleja de la siguiente forma

$$\bar{E}(P_s) = \bar{E}(P_i)TA(s)e^{-jks} \quad (3.2)$$

Siendo  $T$  la matriz de transmisión que recoge las características electromagnéticas de la placa, el ángulo de incidencia y la polarización.

Cuando un rayo alcanza al receptor después de reflejarse el campo en el punto  $P_s$  puede calcularse mediante el valor del campo en el punto de reflexión  $P_r$  como

$$\bar{E}(P_s) = \bar{E}(P_r)RA'(s)e^{-jks} \quad (3.3)$$

En este caso,  $R$  es la matriz de reflexión y recoge los parámetros de fase y polarización del campo receptor; el factor de amplitud  $A'(s)$  es dependiente de la curvatura de la superficie y en este caso al ser planas,  $A'(s) = 1/s$ .

Si el acoplamiento entre transmisor y receptor se debe a un rayo difractado, la expresión que relaciona al campo incidente con el difractado sería la siguiente

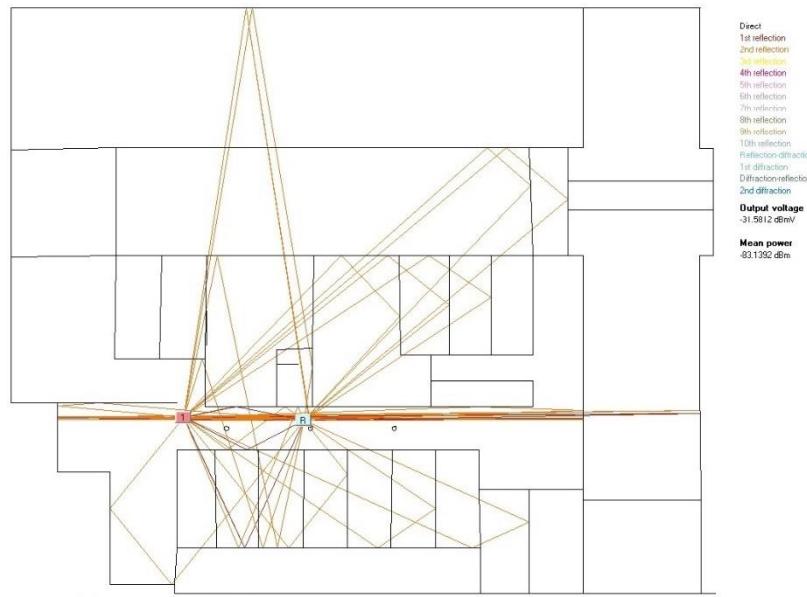
$$\bar{E}(P_s) = \bar{E}(P_d)DA''(s)e^{-jks} \quad (3.4)$$

siendo  $P_d$  el punto de difracción y  $D$  la matriz de difracción.

### 3.4.3 Trazado de rayos

El acople entre la antena transmisora y la receptora en este programa se obtiene a partir de la combinación de varios mecanismos de dispersión seleccionables por el usuario: rayo directo, simple, doble, triple y cuádruple reflexiones; rayos simple y doble difractados; y combinaciones de ambos.

CINDOOR usa una técnica basada en la teoría de imágenes combinada con el algoritmo BSP (Binary Space Partitioning). Para el cálculo de los puntos de difracción se tienen en cuenta todas las aristas del modelo. Todos los parámetros necesarios para calcular el campo radiado se obtienen independientemente del tipo de placa analizada usando un sistema local de coordenadas con el eje z que coincide con la normal de la placa. Mediante el algoritmo BSP se determina qué placas son atravesadas por los rayos. En la Figura 3.17 se muestra la salida gráfica con el trazado de rayos en un escenario de interior utilizado como base de ejemplo.



**Figura 3.17 Ejemplo de trazado de rayos en CINDOOR.**

#### 3.4.4 Caracterización del canal radio en CINDOOR

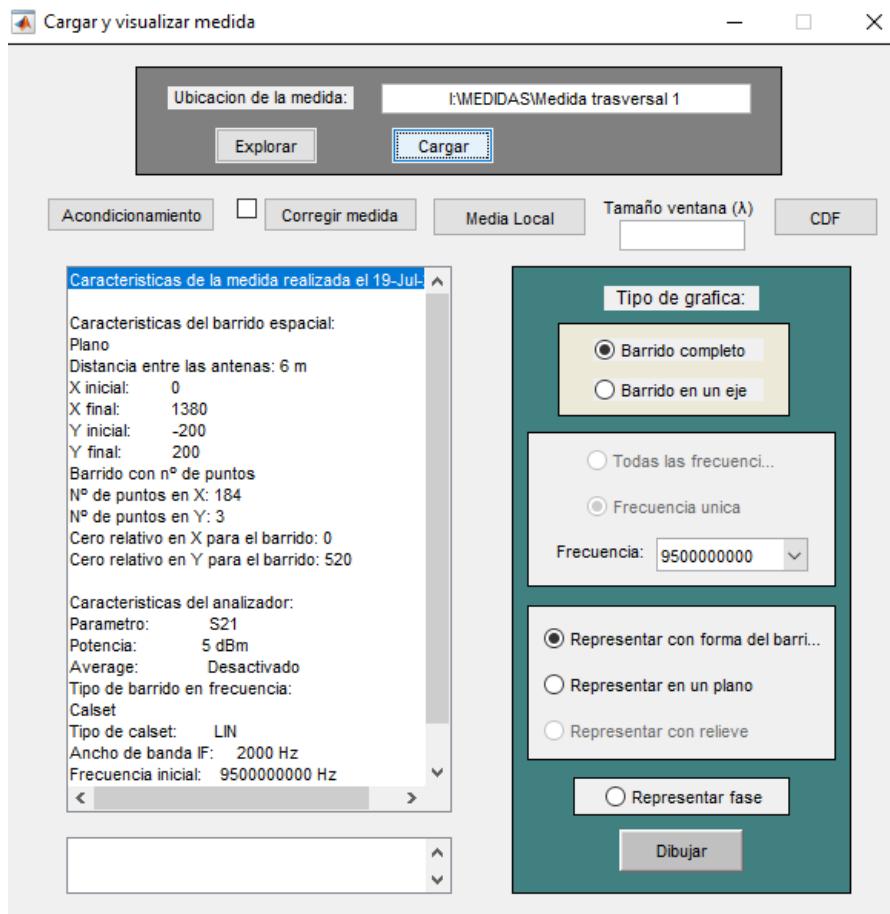
CINDOOR, en banda estrecha, caracteriza el nivel medio de potencia de los diferentes puntos del espacio (cobertura), y la estadística de desvanecimientos. Una vez conocida la respuesta al impulso, pueden determinarse parámetros tales como el retardo medio, la dispersión del retardo y el ancho de banda de coherencia.

CINDOOR como herramienta para caracterizar el canal radio ofrece las siguientes facilidades:

- Estudio de cobertura en dos dimensiones.
- Estadística de los desvanecimientos, obteniendo también la función de distribución de probabilidad acumulada, y la de Rice cuyo parámetro K se obtiene ajustando los datos a simular.
- Respuesta al impulso, perfil potencia de retardo, retardo medio y dispersión del retardo.
- Función de autocorrelación en frecuencia y ancho de banda de coherencia para un factor de 0.5.

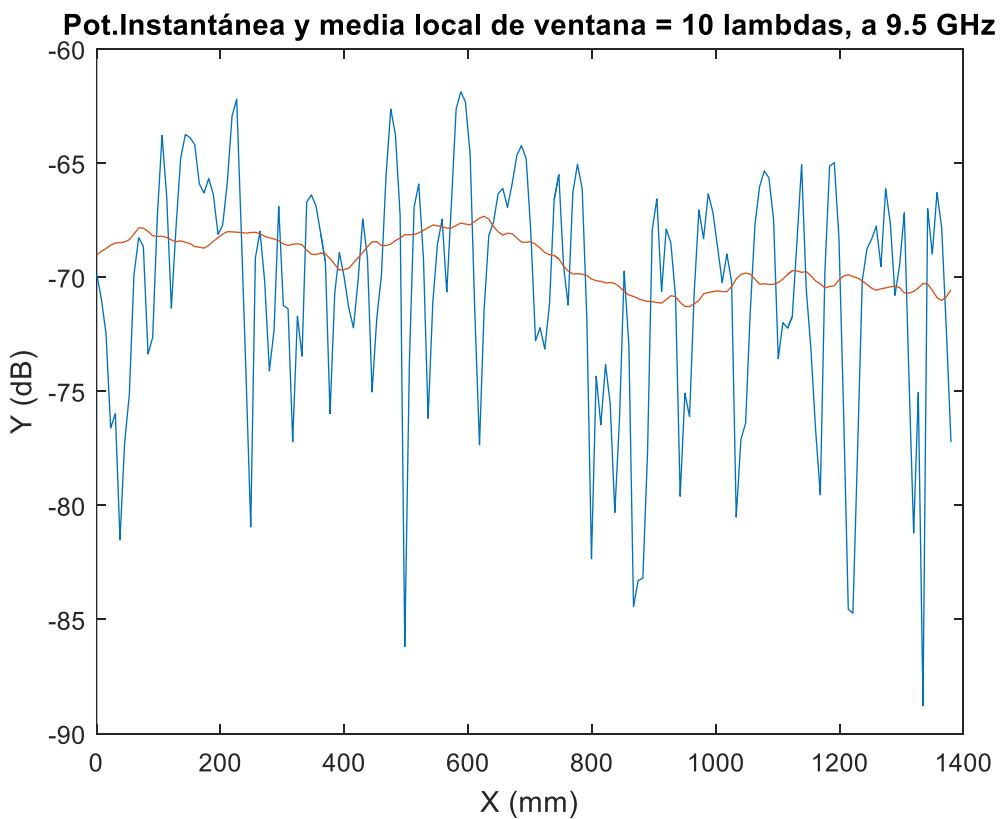
### 3.5. Modificaciones añadidas al software de medida del canal radio

Se han añadido varios complementos al software utilizado en este TFG para obtener ciertos parámetros que inicialmente no se podían visualizar en las gráficas de los resultados de las medidas del programa original. Las modificaciones se han incorporado sobre la interfaz que se muestra en la Figura 3.18 y que da acceso a la representación de resultados.

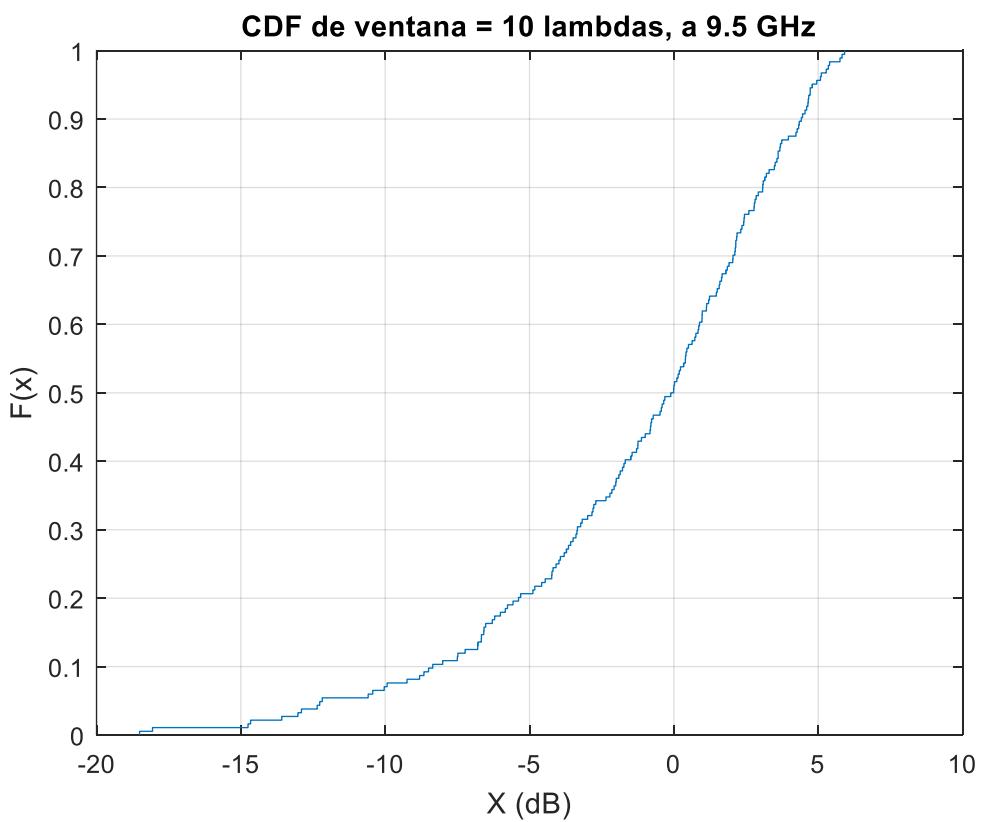


**Figura 3.18.** Programa *Cargar y visualizar medida* modificado

Se han añadido dos aplicaciones dentro del programa *Cargar y visualizar medida*. El primero, *Media Local*, obtiene la media local de la potencia de la medida seleccionada a una frecuencia y un tamaño de ventana deslizante concreto. Con esto podemos ver la variación de los desvanecimientos a gran y pequeña escala, tal y como se presenta como ejemplo en la figura 3.19 para una medida del canal radio en interiores y a la frecuencia de 9,5 GHz. Por otro lado, también se ha añadido una aplicación, *CDF*, que dibuja como resultado la probabilidad acumulada en base a los valores sobre la media de las medidas realizadas. Ambos complementos han sido clave para poder visualizar con más claridad los resultados obtenidos y poder compararlos con los obtenidos en las simulaciones con el programa en *CINDOOR*.



**Figura 3.19** Ejemplo de gráfica incluyendo la media local de la medida.



**Figura 3.20** Gráfica de la probabilidad acumulada de la medida.

# Capítulo 4

## Medidas y resultados

### 4.1. Introducción

Se ha llevado a cabo una campaña de medidas con el objetivo de analizar el canal radio en banda estrecha en diferentes entornos de interior, tanto encontrándose las antenas con línea de visión directa *LOS* como en situaciones en las que sólo la había parcialmente, *NLOS/LOS*. Las medidas fueron realizadas en la planta -2 del Edificio Ingeniería de Telecomunicación Prof. José Luis García, centrando los estudios en el pasillo principal del departamento y en el laboratorio de simulación S220.

El capítulo se estructura en tres partes. La primera parte mostrará los diferentes escenarios en donde se realizaron las medidas y los resultados obtenidos de las mismas. A su vez estos resultados serán comparados con los calculados en *CINDOOR* en entornos simulados similares a los reales. La segunda parte consta de un apartado de conclusiones en donde se realizará un resumen de los datos obtenidos y se realizará un análisis sobre los mismos.

### 4.2. Entorno de medida y resultados

#### 4.2.1. Procedimiento de medidas

Para la realización de las medidas se utilizó el sistema ya descrito en el capítulo anterior (ver Figura 3.1).

El proceso de medida comienza con la calibración del PNA en los extremos de los cables SUCOFLEX 104 conectados en cada puerto del equipo. La base de la configuración del equipo incluye, entre otros, el rango de frecuencias en el que se realizaron las mediciones de 9.5 GHz a 10.5 GHz, la frecuencia intermedia de 2KHz, el parámetro de scattering a medir, en este caso el S21, y el número de puntos de medida que se iban a tomar, 401 en todos los casos.

En las medidas realizadas el eje Y de las dos unidades lineales permanece fijo mientras el eje X desplaza la antena receptora. De los 401 puntos de medida, se tomaron como base para el posterior estudio comparativo CINDOOR 3 frecuencias, los extremos de la banda de medida y la frecuencia central (9.5, 10 y 10.5 GHz). Para la obtención de las gráficas y la representación estadística de la señal se optó por una ventana de 10 longitudes de onda, la cual en estas medidas permite observar con claridad la evolución de la señal durante la trayectoria de la antena receptora.

Debido a las altas frecuencias a las que se están realizando las medidas, la precisión en la colocación de las antenas no es trivial ya que unas desviaciones de varios centímetros pueden suponer cambios sustanciales en las medidas tomadas. Por ello se anotó de forma precisa y detallada las posiciones de las antenas y las unidades lineales con respecto al entorno de medida. Se incluirán en cada apartado las posiciones de las antenas complementando dichos datos con fotos del escenario de medida.

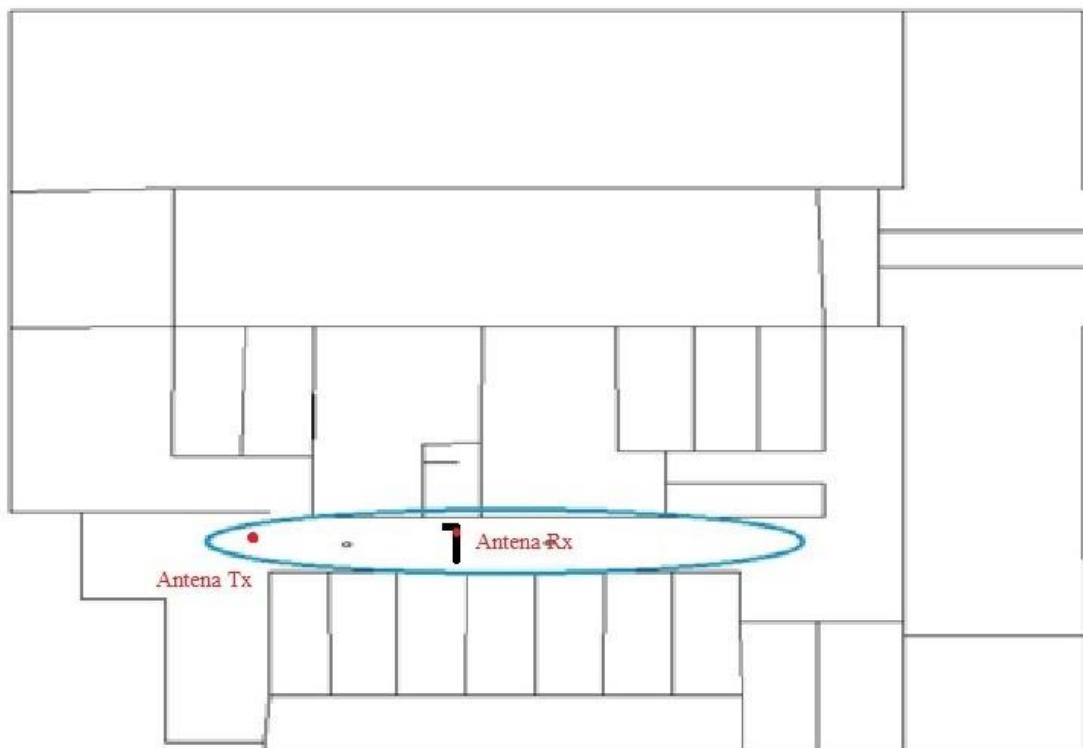
#### 4.2.2. Resultados y escenario de medida

##### *Medidas en pasillo. Área del grupo GISAR, planta -2*

El primer entorno de medidas se sitúa en el pasillo principal de la planta -2 del edificio, junto al laboratorio S220. Cabe destacar que dicha zona posee un amplio número de despachos, mobiliario metálico y columnas, a lo que hay que añadir también la presencia de la propia instrumentación de medida en el momento de realizar las medidas.

En este escenario de medida se situaron las unidades lineales en posición transversal con respecto a la antena transmisora, de tal manera que la línea de visión se ve modificada conforme avanza la trayectoria de la antena receptora y aparecen elementos interferentes como pudieran ser las columnas del pasillo.

El escenario de medida aparece representado en las Figuras 4.1-4.3, se colocó la unidad lineal a 11,25 metros de la pared del fondo donde se encontraba la antena transmisora. La antena receptora se colocó, desde su posición inicial (izquierda), a 0.97 metros de la pared izquierda (extintor) y a 0.30 de la derecha. La antena transmisora, Figura 4.3 se colocó a 0.29 metros y 0.34 metros, ancho y largo con respecto a la pared. Las alturas de las antenas eran de 2.24 metros la transmisora y 1.5 metros la receptora.



**Figura 4.1.** Plano del Departamento Ingeniería de Comunicaciones, Planta -2, Zona Pasillo, con detalle de la situación de las antenas.



**Figura 4.2.** Detalle del entorno de medida, equipo de medida y antena receptora.

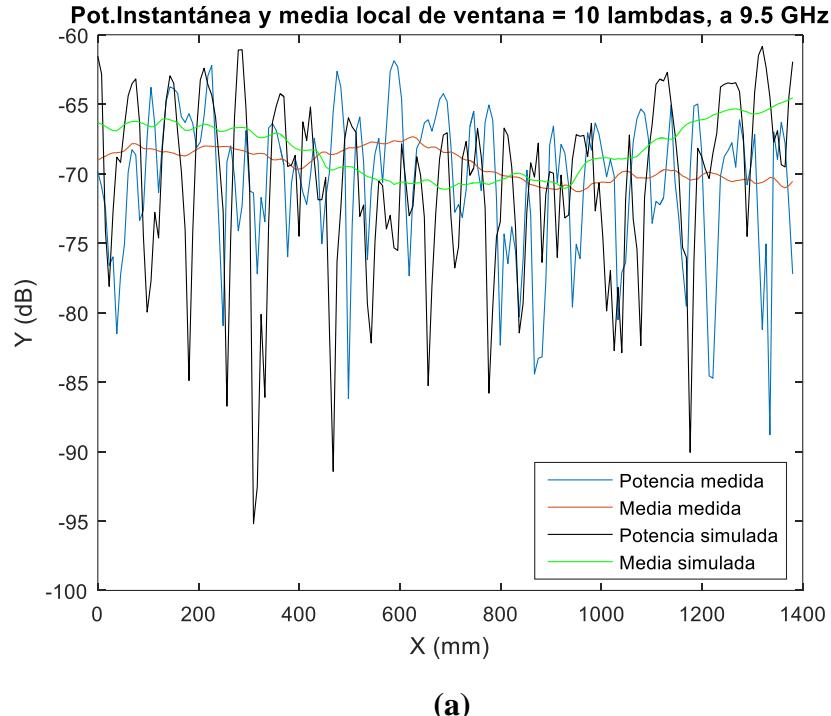


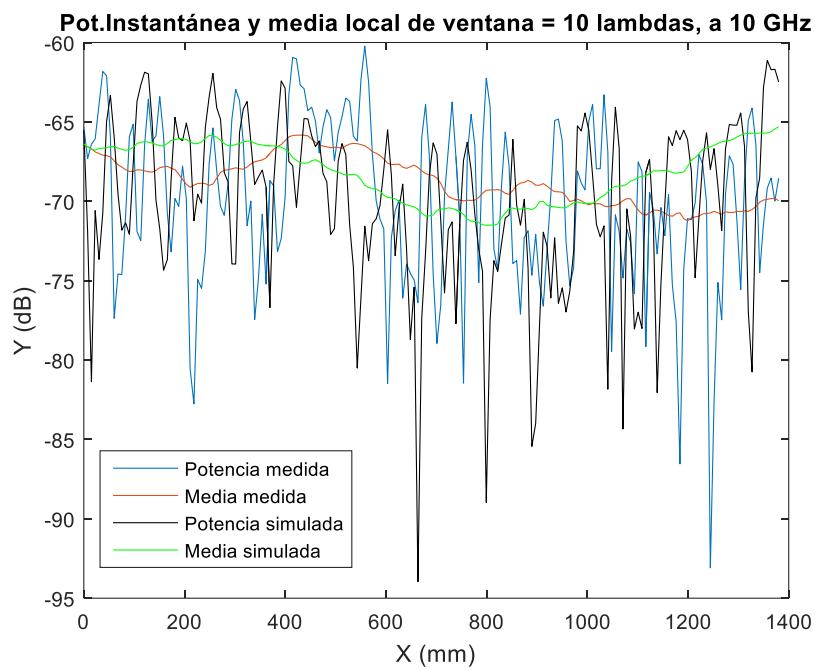
**Figura 4.3.** Detalle de la antena transmisora.

En la Figura 4.4 se presentan las gráficas de las señales de potencia instantánea y media local calculadas en las 3 frecuencias estudiadas, tanto como resultado de la medición realizada como de la simulación con *CINDOOR*.

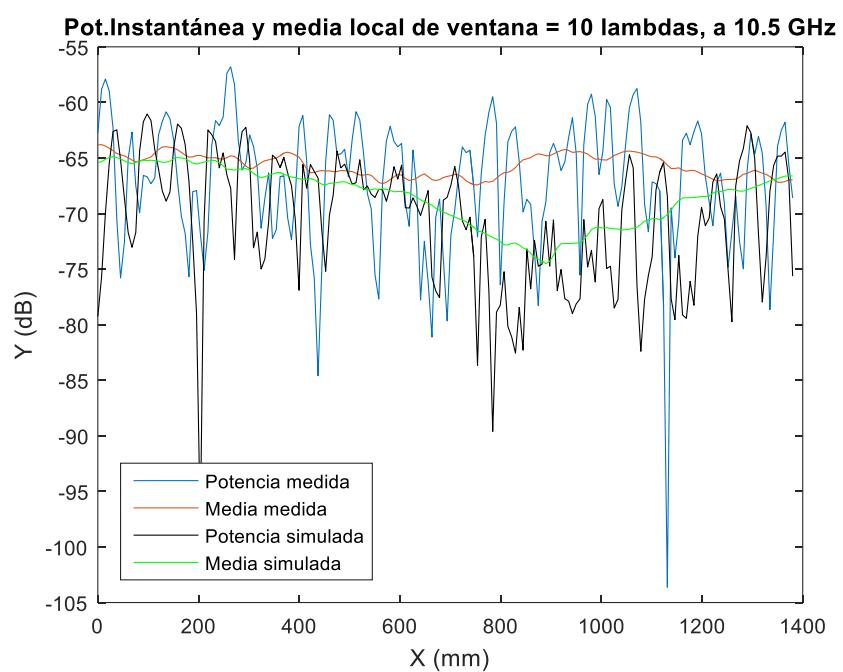
Se puede observar que en este escenario de medida las gráficas de los resultados medidos y los simulados presentan bastantes similitudes en las 3 frecuencias. La diferencia entre potencias en ambos resultados fluctúa muy poco al principio de la trayectoria en las 3 gráficas, presentando diferencias más amplias a partir de los 650mm de trayectoria. Dicha diferencia coincide con la situación de la columna del pasillo que obstruye la línea de visión directa entre las antenas, y conforme se sube en frecuencia los cambios parecen más visibles llegando a unos 5dBm en la medida de 10.5GHz. Cabe destacar también los desvanecimientos en pequeña escala observados tanto al principio de la trayectoria, en la zona de la columna y en el final del movimiento de la antena, pudiendo estar relacionados los numerosos elementos metálicos como las puertas, extintores e incluso las múltiples trayectorias que presenta un pasillo en el que hay múltiples reflexiones de la señal. En la Figura 4.5 se observa que las gráficas de la CDF de la señal medida y la simulada prácticamente se superponen presentando mínimas variaciones.

En todas las medidas, el eje Y representa, en el caso de las medidas reales, la suma del parámetro S21, las pérdidas de canal y las ganancias de las antenas; en las medidas simuladas se ha normalizado la potencia de transmisión a 0 dBm y se le ha sumado las pérdidas de canal junto con unas ganancias de antena similares a las de las ganancias de antena.



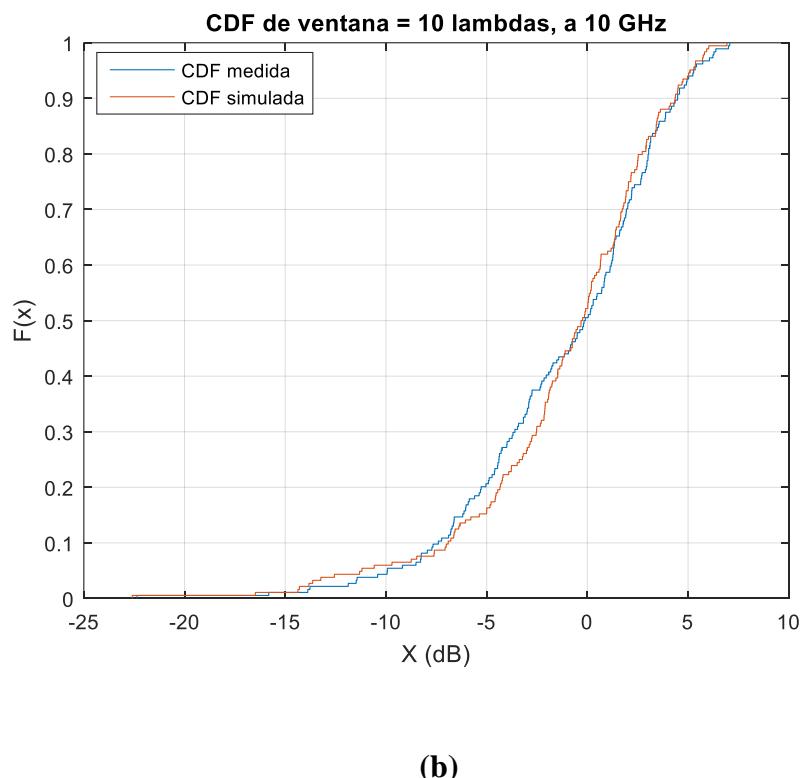
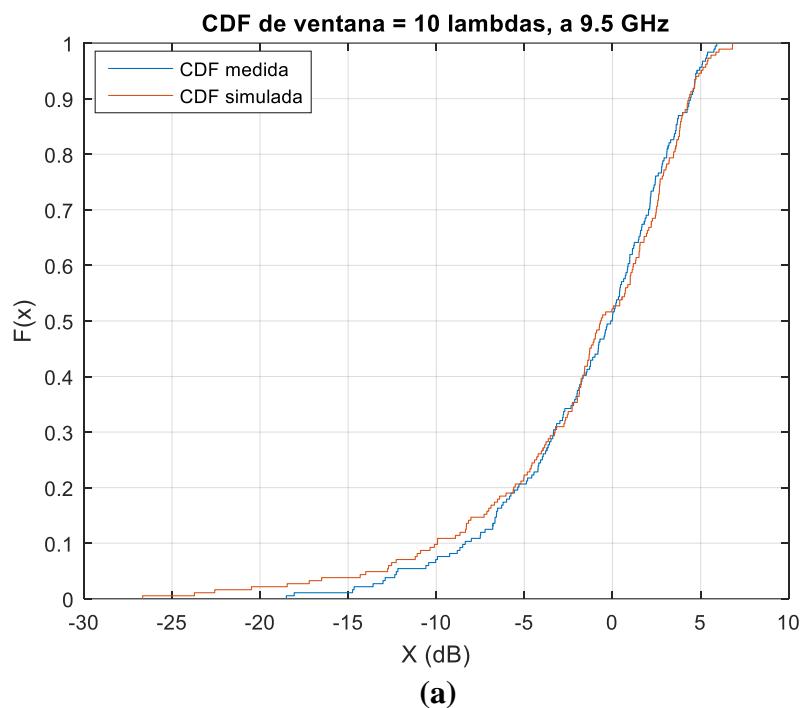


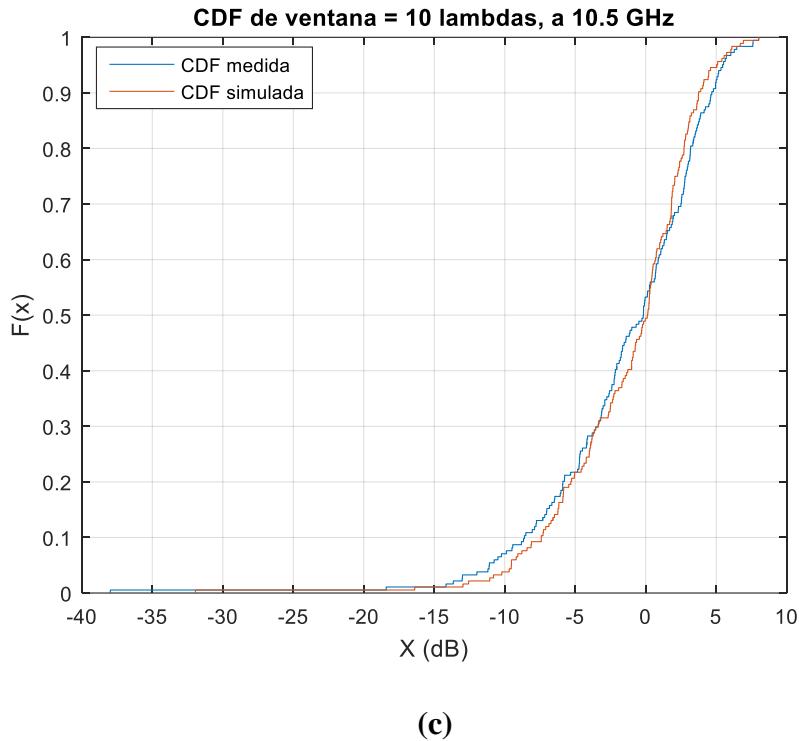
(b)



(c)

**Figura 4.4** Potencia Instantánea y media local medidas y simuladas. (a) 9,5 GHz (b) 10GHz, (c) 10.5GHz





(c)

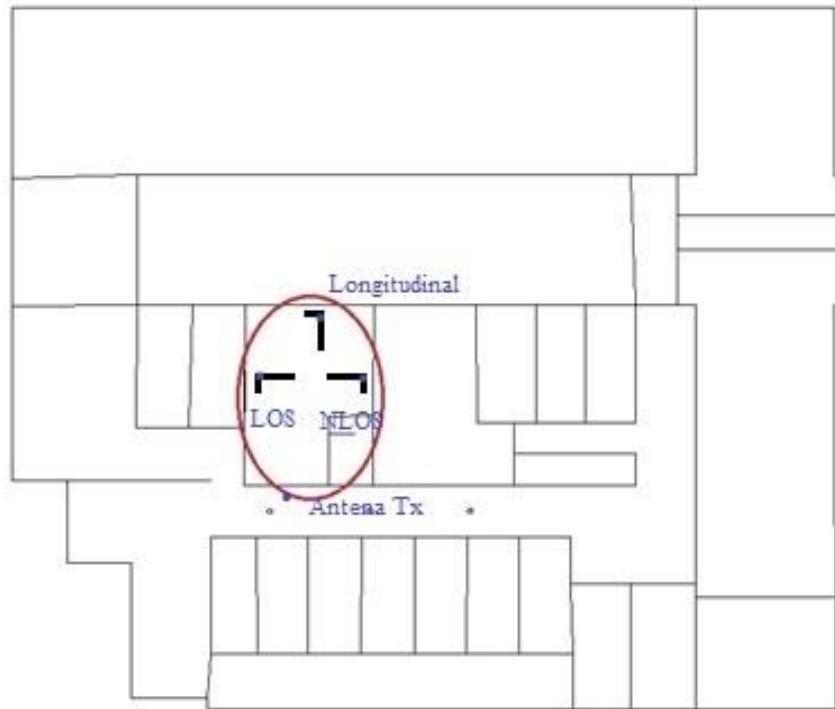
**Figura 4.5** Probabilidad acumulada de la potencia por encima de la media normalizada.  
 (a) 9.5GHz, (b) 10GHz, (c) 10.5 GHz

### *Medidas en Laboratorio de Simulación, planta -2*

El Laboratorio de Simulación es un entorno sensiblemente diferente al pasillo en donde se realizaron las primeras mediciones. Es un entorno cerrado con muchos elementos metálicos y numeroso material de oficina que producen numerosas componentes multirayecto que habrá que tener en cuenta a la hora de analizar los desvanecimientos en las medidas.

La antena transmisora se situó fuera del laboratorio mientras que la receptora, junto con la unidad lineal que la mueve, fue colocada en 3 posiciones diferentes dentro del recinto. La primera trayectoria, con la antena receptora alineada de manera longitudinal con respecto a la transmisora, presenta una línea de visión directa en todo su recorrido, aunque existen elementos que obstruyen la línea de visión parcialmente como pudiera ser el quicio metálico de la puerta de entrada. En las otras dos posiciones se colocó la antena receptora tanto a la izquierda del laboratorio como a la derecha, y en ambos casos de manera transversal respecto a la transmisora, gozando la primera de una línea de visión directa mientras que la otra, en la mayoría del recorrido quedaba en situación NLOS al quedar oculta por la zona del archivo que se encuentra en el laboratorio.

En la figura 4.6 se resalta la zona en donde se realizaron las mediciones y en la figura 4.7 se muestra una foto panorámica del entorno.



**Figura 4.6.** Plano del Entorno de medida en el Laboratorio de Simulación. Situación aproximada de las antenas y las diferentes situaciones de las unidades lineales.



**Figura 4.7** Foto panorámica del Laboratorio de Simulación, S220

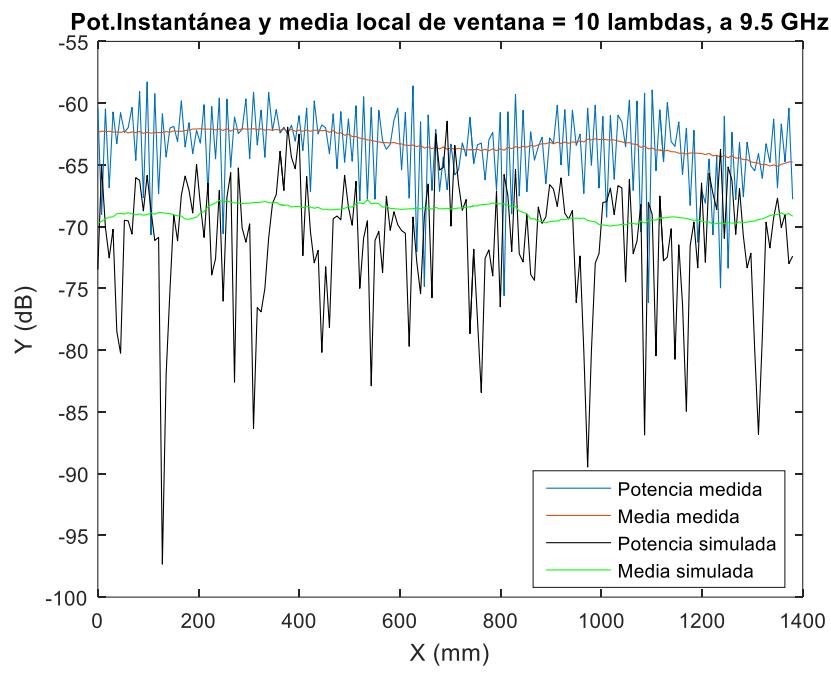
a) Medida en posición longitudinal

En esta medida la antena receptora se situó desde su posición inicial a 0.90 metros de la pared del fondo y a 3.64 metros de la pared derecha del laboratorio. En todas las medidas realizadas en este escenario, la antena transmisora se colocó a 0.74 metros de la columna

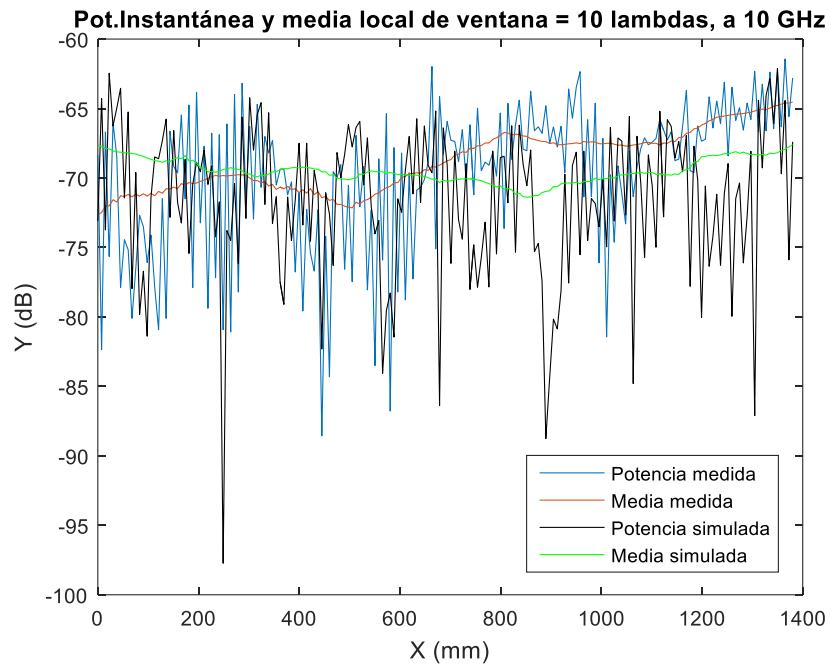
y 1.5 metros de la entrada. La altura de las antenas transmisora y receptora es 2.23 y 1.5 m respectivamente y se mantienen también para el resto de las medidas.

En la Figura 4.8 se pueden observar los resultados de la medida comparados con los obtenidos con CINDOOR para este caso.

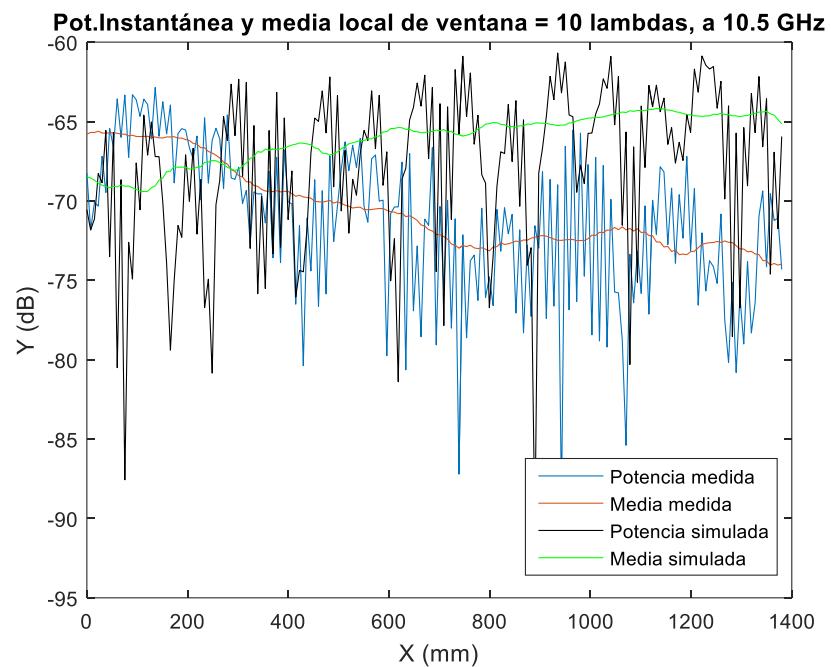
Estos resultados son los que presentan más variaciones entre las medidas y la simulación, tanto en las fluctuaciones de la potencia instantánea como en la media local de la misma, llegando en las frecuencias más altas a diferencias de 9 dB. Las fluctuaciones tan rápidas de la señal medida pueden guardar relación con el elemento absorbente colocado junto a la antena que afecta especialmente a la señal en esta disposición longitudinal de las unidades lineales. Con respecto a la variación de la potencia media, se estima que es debida a que en la simulación no se modelaron ciertos elementos dispersores como parte del mobiliario con elementos metálicos y los ordenadores del laboratorio, pudiendo ser estos a altas frecuencias, susceptibles de contribuir a las diferencias observadas.



(a)



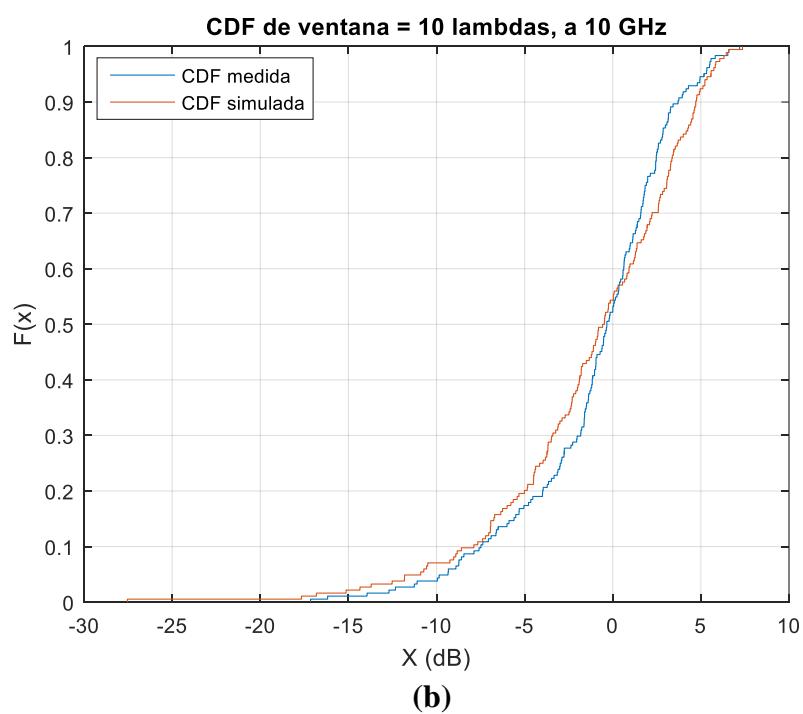
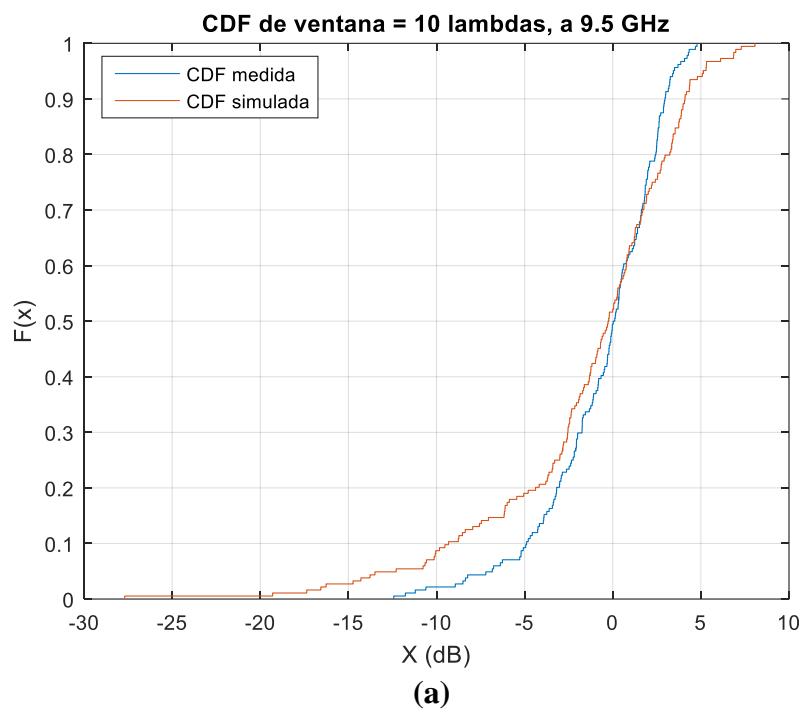
(b)

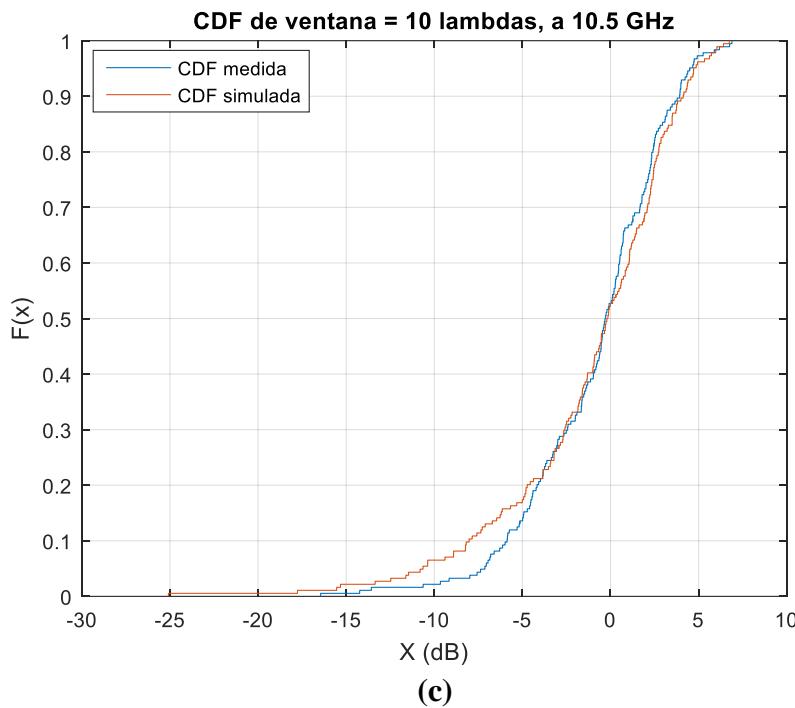


(c)

**Figura 4.8** Potencia Instantánea y media local medidas y simuladas. (a) 9,5 GHz (b) 10GHz, (c) 10.5GHz

Las CDF de las gráficas de la Figura 4.9 presentan ciertas diferencias entre las medidas y las simulaciones debido a lo comentado anteriormente. Se percibe que existe una correlación más baja en los resultados en especial en potencias bajas.



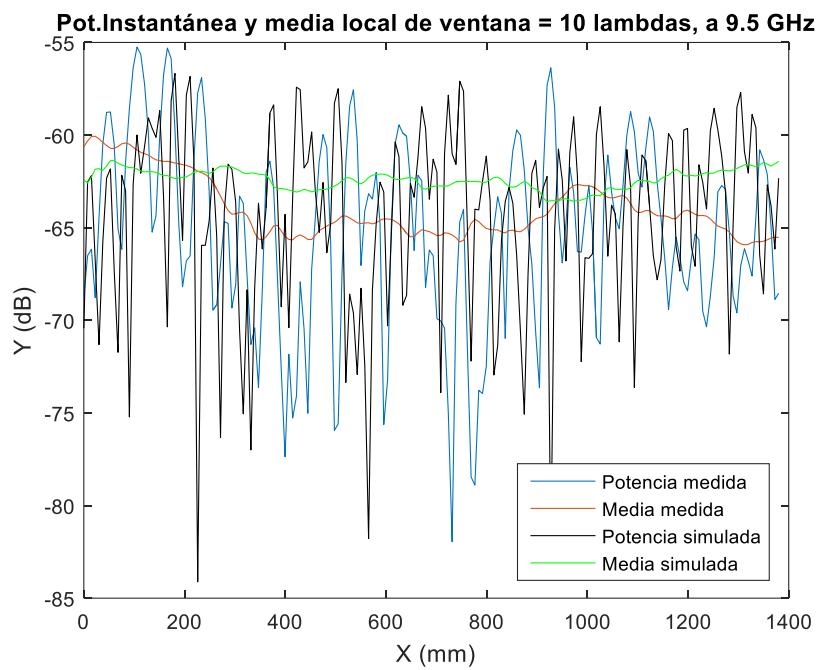


**Figura 4.9** Probabilidad acumulada de la potencia por encima de la media normalizada.  
 (a) 9.5GHz, (b) 10GHz, (c) 10.5 GHz

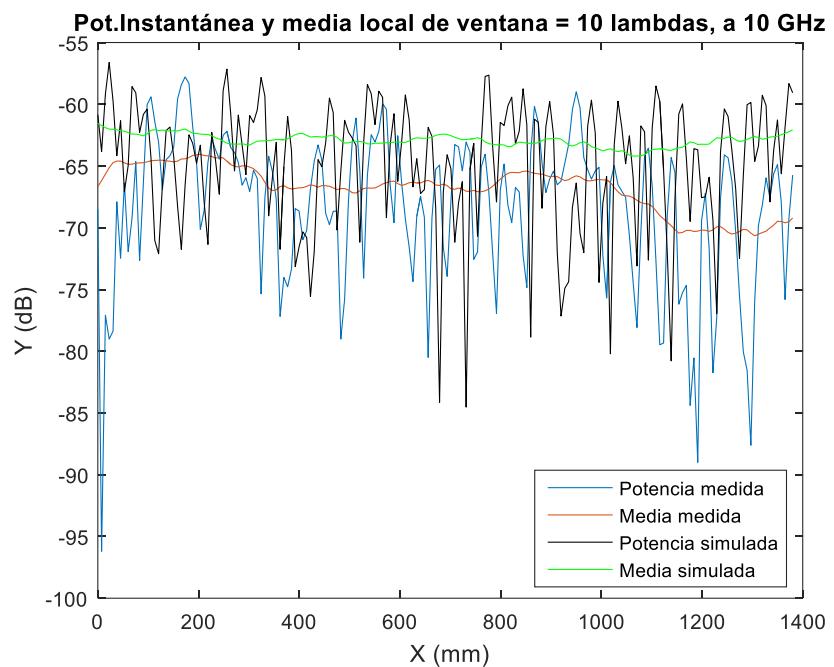
**b) Medida con posición transversal, LOS.**

En esta medida se situaron las unidades lineales en la parte izquierda del laboratorio con respecto a la antena transmisora teniendo línea de visión directa entre ella y la receptora. La unidad lineal se situó a 1.5 metros de la pared izquierda del laboratorio y a 3.56 metros de la pared del fondo.

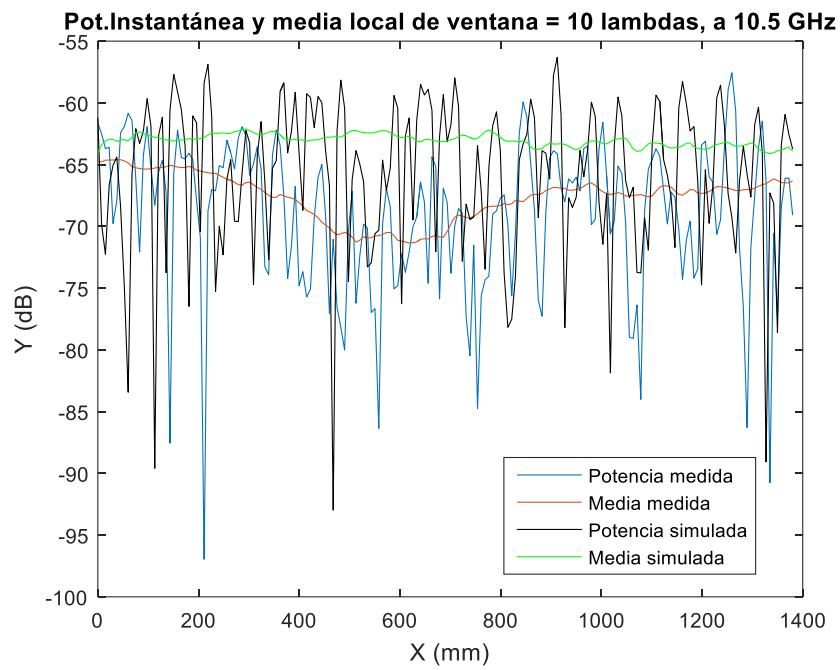
En la figura 4.10 se observan los resultados de las medidas y la simulación del escenario del laboratorio con LOS. Como se comentó anteriormente, la diferencia de la potencia simulada con la de la medida es debido a una falta de representación de elementos dispersores en el entorno de simulación, ya que, salvo esa diferencia, las señales presentan una forma muy parecida. Cabe destacar una bajada en la potencia media del resultado de la medición a mitad de la trayectoria. Dicha bajada entorno a los 3-5dB, dependiendo de la frecuencia, es debido a el mobiliario que atraviesa la trayectoria de la señal en ese tramo. Los numerosos desvanecimientos en las gráficas son característicos de un entorno como en el que se realizó las mediciones, con muchos dispersores y consecuentemente muchas trayectorias multicamino.



(a)



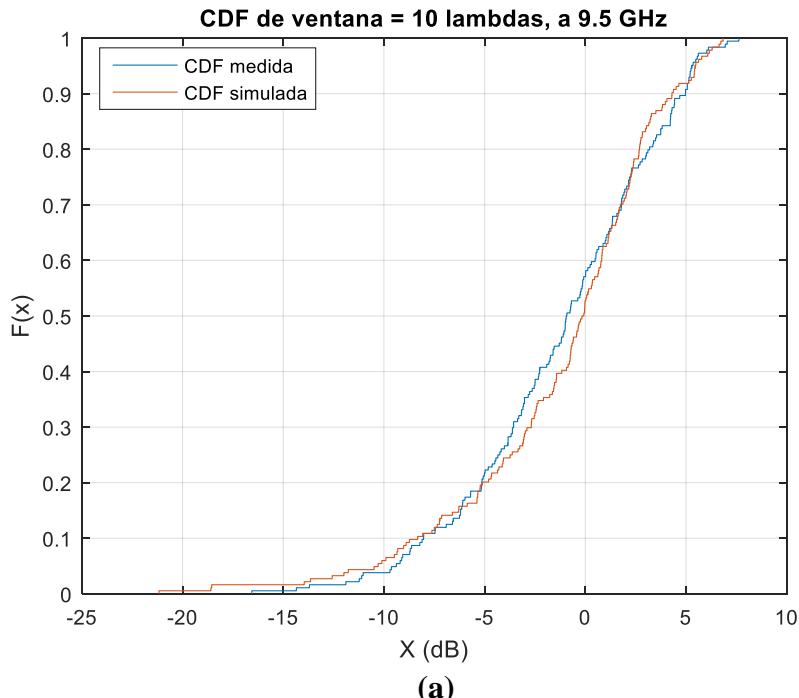
(b)



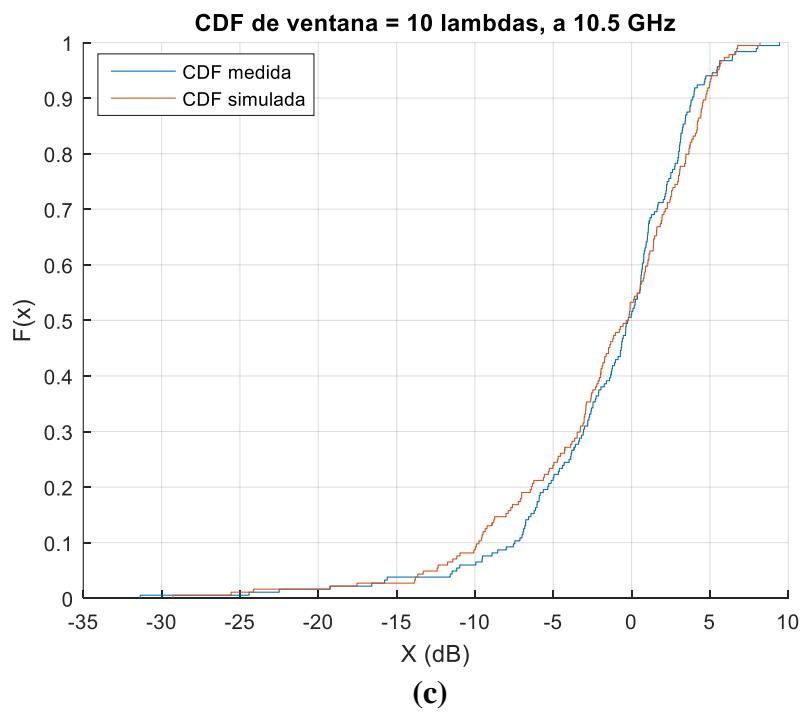
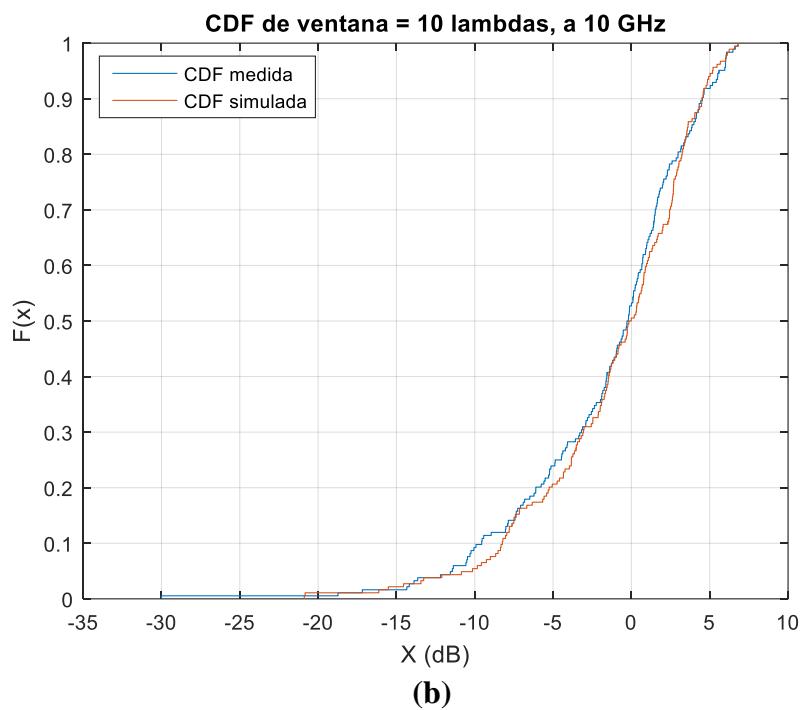
(c)

**Figura 4.10** Potencia Instantánea y media local medidas y simuladas. (a) 9,5 GHz (b) 10GHz, (c) 10.5GHz

Las curvas de las CDF presentan una forma muy similar entre las medidas y las simuladas, con la salvedad de alguna pequeña diferencia en las curvas debido a la diferencia entre potencias medias.



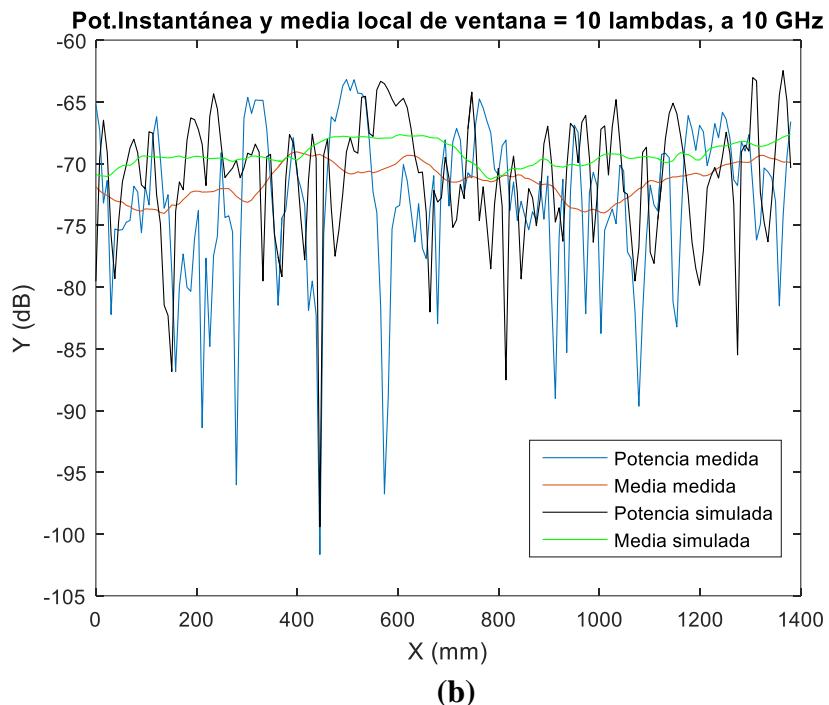
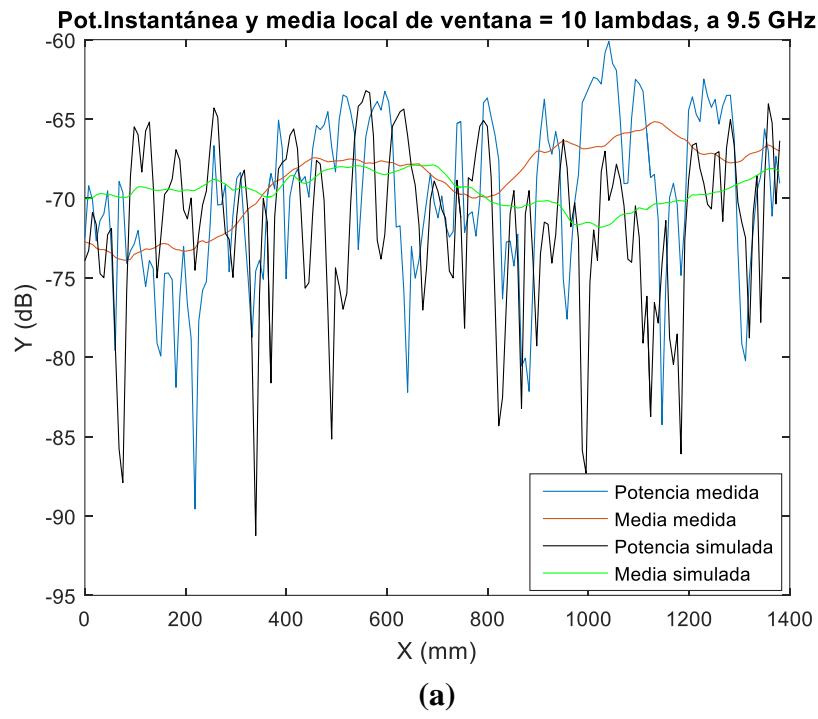
(a)

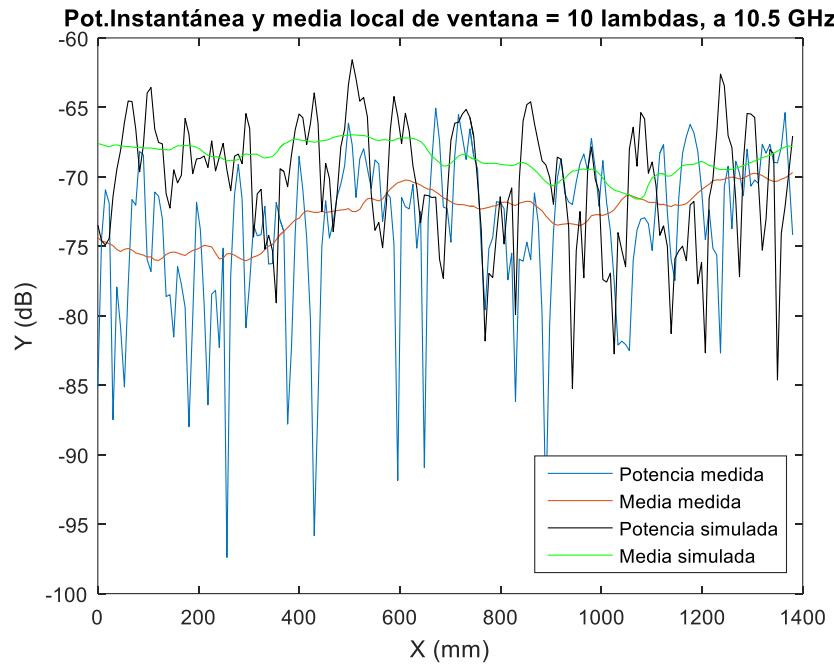


**Figura 4.11** Probabilidad acumulada de la potencia por encima de la media normalizada. (a) 9.5GHz, (b) 10GHz, (c) 10.5 GHz

c) Medida en posición transversal, NLOS/LOS.

En esta medida la unidad lineal se situó en la parte derecha del laboratorio con una parte inicial del trayecto sin línea de visión directa, NLOS, llegando a tener LOS en el tramo final. En esta medida se colocó la antena receptora en su punto inicial a 0.9 metros de la pared derecha y a 2.9 metros de la pared del fondo. En la Figura 4.12 se observa de manera clara que, tanto en los resultados de la medida como en la simulación, la potencia media sube a medida que la trayectoria de la antena receptora avanza. Esto se debe a la transición de NLOS a LOS. Los desvanecimientos más profundos situados al principio del desplazamiento de la antena receptora se corresponden con la zona NLOS en donde la trayectoria estaría reflejada por la pared.

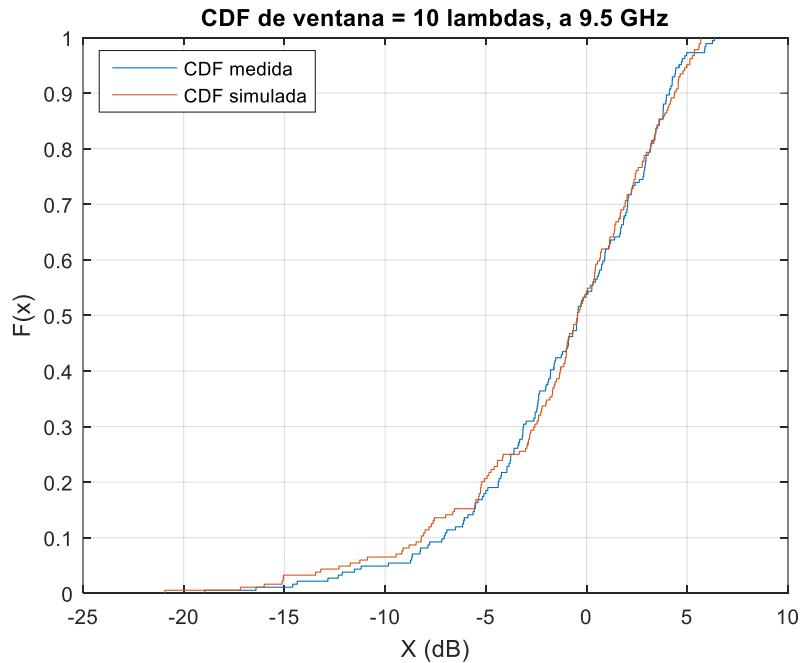




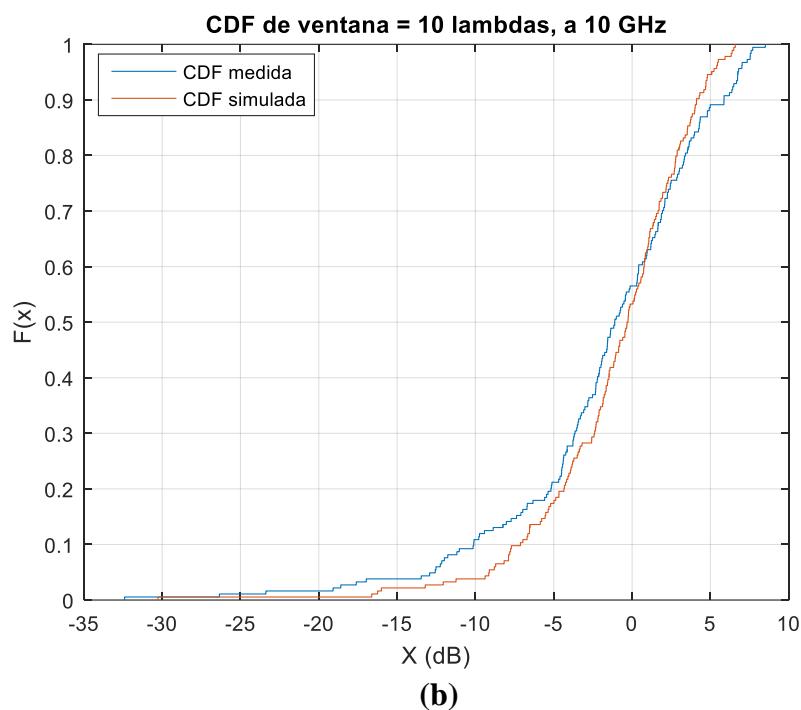
(c)

**Figura 4.12** Potencia Instantánea y media local medida y simulada. (a) 9,5 GHz (b) 10GHz, (c) 10.5GHz

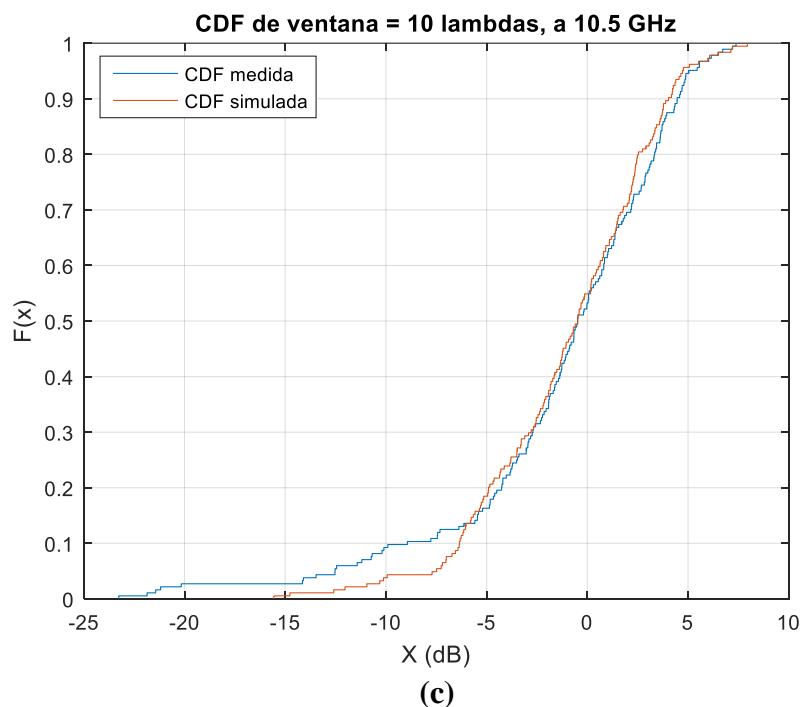
En la Figura 4.13 se observan las gráficas de las curvas de las CDF de las señales. Conforme la frecuencia aumenta las variaciones entre las curvas se van haciendo mayores, esto es debido a las diferencias entre las potencias medias de las medidas reales y las simuladas.



(a)



**(b)**



**(c)**

**Figura 4.13** Probabilidad acumulada de la potencia por encima de la media normalizada. (a) 9.5GHz, (b) 10GHz, (c) 10.5 GHz

*d) Tabla de diferencias entre potencias medias*

Se ha calculado la diferencia media de la potencia media local en las diferentes frecuencias y entornos de medida para obtener una representación cuantitativa del análisis realizado de las medidas.

Se ha tomado como referencia el resultado de la medida local de la simulación con respecto al de la medida.

**Tabla 4.1** Diferencia entre potencias medias (medidas vs simuladas con CINDOOR).

	<b>9.5GHz</b>	<b>10GHz</b>	<b>10.5GHz</b>
<b>Pasillo</b>	1.0903 dB	0.5605 dB	-2.7471 dB
<b>Lab.Longitudinal</b>	-5.7353 dB	-0.6869 dB	4.4709 dB
<b>Lab.LOS</b>	1.5789 dB	3.9135 dB	4.5885 dB
<b>Lab.NLOS</b>	-0.6252 dB	2.1841 dB	4.0448 dB

Como se comentó en el análisis de las medidas, a medida que la frecuencia aumenta la diferencia entre la potencia media simulada y la medida se hace más grande.

*e) Tabla de diferencias entre curvas CDF*

En esta tabla se muestra la diferencia del error medio entre las curvas de las CDF de las medidas reales y las simuladas.

**Tabla 4.2** Diferencia entre curvas de probabilidad acumulada (CDF).

	<b>9.5GHz</b>	<b>10GHz</b>	<b>10.5GHz</b>
<b>Pasillo</b>	0.1561 dB	0.0120 dB	0.2123 dB
<b>Lab.Longitudinal</b>	0.3342 dB	0.0624 dB	0.3697 dB
<b>Lab.LOS</b>	0.1073 dB	0.5060 dB	0.4572 dB
<b>Lab.NLOS</b>	0.1071 dB	0.2447 dB	0.4728 dB

Por lo general, con el aumento de la frecuencia el error entre curvas se va haciendo mayor.

### 4.3. Conclusiones

El objetivo de este capítulo era analizar y comparar las medidas obtenidas de la campaña de medición con los resultados obtenidos de las simulaciones de *CINDOOR*.

Cabe destacar que los resultados de las medidas obtenidas tienen una gran similitud con los resultados de la simulación, si bien las diferencias y anomalías observadas tienen que ver con que no se tuvieron en cuenta ciertos elementos dispersores, una posible modificación de las ganancias de las antenas y pérdidas en los cables coaxiales que pudieron descompensar en cierta manera la potencia medida.

Por todo ello, se llega a la conclusión de que las medidas se han realizado correctamente logrando caracterizar de manera aproximada el canal radio y que el programa *CINDOOR*

responde aceptablemente a las medidas reales, pero en altas frecuencias requiere de un detalle del entorno mucho más preciso, y un ajuste de potencia con la pérdidas y ganancias de los componentes del equipo de medida

# **Capítulo 5**

## **Conclusiones y líneas futuras**

### **5.1. Conclusiones**

En este trabajo se ha analizado el canal radio en banda de 10GHz en dos entornos muy distintos, uno de pasillo con ciertos elementos interferentes propios del edificio como las columnas o puertas, y otro de laboratorio/oficina el cual presenta más componentes multicamino que el primero.

Se han presentado dos tipos de resultados diferentes, uno a partir de medidas reales y otro simulado mediante el software CINDOOR, utilizando como referencia un modelo geométrico descriptivo del entorno en este caso. Comparando los distintos resultados

El sistema de medida que se ha usado para la realización de las medidas ha facilitado enormemente el proceso de medidas, automatizando los movimientos de la antena receptora como la obtención de medidas por parte del analizador de redes. Destacar también el uso de programas como *Matlab* y *CINDOOR* que han permitido obtener los datos requeridos para el trabajo y poder compararlos de una manera bastante ajustada a lo deseado.

Se puede llegar a la conclusión de que para la caracterización del canal radio en altas frecuencias es determinante caracterizar el efecto multicamino, ver los efectos del mismo en la señal y la dependencia de esta sobre los diferentes elementos de cada entorno y obtener unos resultados estadísticos acordes con la teoría.

### **5.2. Líneas futuras**

Este trabajo se podría ampliar y profundizar más en el estudio del canal, realizando otro tipo de medidas en otros entornos y obtener otro tipo de resultados e incluso añadiendo diferentes parámetros que permitan caracterizar de manera más exhaustiva el canal radio. Por otro lado, como líneas futuras de estudio se podría analizar el canal radio a partir de arrays de antenas en entornos de interior e incluso aplicar técnicas MIMO con más antenas implicadas en la transmisión y recepción como se estima que se despliegue en un futuro la tecnología 5G e incluso analizar otras bandas de frecuencias que han previsto como propicias para las futuras redes de comunicaciones.

# Bibliografía

- [1] "Spectrum policy and regulatory issues", IEEE Wireless Communications, Vol: 22, Issue: 4, August 2015
- [2] "5G Vision", Samsung R&D, Febrero, 2015.
- [3] "The Requirements, Challenges, and Technologies for 5G of Terrestrial Mobile Telecommunication", IEEE Communications Magazine (Vol: 52, Issue: 5, May 2014 )
- [4] "Application scenarios and enabling technologies of 5G", China Communications ( Volume: 11, Issue: 11, Nov. 2014 )
- [5] "The Mobile Radio propagation Channel", D.Parsons, Pentech Press 1992.
- [6] "Networks, Vehicular Technologies: Increasing Connectivity", Dr. Miguel Almeida Chapter 21: "Propagation Aspects in Vehicular Networks", Lorenzo Rubio, Juan Reig, Herman Fernandez. (Ed.), InTech ,2011.
- [7] "Rayleigh fading channels in mobile digital communication systems. I. Characterization", B.Sklar. IEEE Communications Magazine, Vol: 35 Issue: 9 September 1997.
- [8] "Estimate of local average power of a mobile radio signal" W.C.Y. Lee, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol:34, Issue:1, February 1985.
- [9] "The Indoor Radio Propagation Channel", H.Hashemi, Proceedings of the IEEE, Vol: 81, Issue: 7, July 1993.
- [10] Infranor S.A, "SMT-DB1/m positionneur". (Manual del variador digital).
- [11] Infranor S.A, "AC Servomotors" (Datos técnicos de los motores).
- [12] Tecnopolyer S.L, "Precision planetary gear reducer". (Manual del reductor).
- [13] "Diseño de un entorno automatizado de caracterización de antenas". Trabajo Fin de Carrera, Universidad de Cantabria, Julio 2005, Iván López Barriuso.