

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Máster

**Caracterización del Canal MIMO Masivo en
Interiores Mediante Trazado de Rayos para
Comunicaciones 5G**

**(Characterization of the Massive MIMO
Channel in Indoor Scenarios by using Ray-
Tracing Techniques for 5G Communications)**

Para acceder al Título de

***Máster Universitario en
Ingeniería de Telecomunicación***

Autor: Pablo Alonso González

Septiembre - 2020



E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACION

MASTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

CALIFICACIÓN DEL TRABAJO FIN DE MASTER

Realizado por: Pablo Alonso González

Directores del TFM: Jesús Ramon Pérez López y Luis Valle López

Título: “*Caracterización del Canal MIMO Masivo en Interiores Mediante Trazado de Rayos para Comunicaciones 5G*”

Title: “*Characterization of the Massive MIMO Channel in Indoor Scenarios by using Ray-Tracing Techniques for 5G Communications*”

Presentado a examen el día: 23 de Octubre de 2020

para acceder al Título de

MASTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

Composición del Tribunal:

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

Secretario (Apellidos, Nombre): Fanjul Vélez, Félix

Vocal (Apellidos, Nombre): Fernández Fernández, Oscar

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de:

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

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

Vº Bº del Subdirector

Trabajo Fin de Máster Nº
(a asignar por Secretaría)

Índice

Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Sistemas 5G: motivación y características.....	1
1.2 Canal Radio.....	3
1.3 Objetivos	4
Capítulo 2. Caracterización del canal radio: MIMO masivo.....	6
2.1 Introducción a MIMO	6
2.1.1 Point-to-Point MIMO	6
2.1.2 Multi-User MIMO	9
2.2 Massive MIMO.....	11
2.2.1 Codificación	11
2.2.2 Estimación del Canal Radio	13
2.2.3 Rendimiento de un sistema Massive MIMO	14
Capítulo 3. Caracterización del canal radio: trazado de rayos y análisis experimental..	16
3.1 Trazado de Rayos: CINDOOR	16
3.1.1 Modelo 3D GO/UTD.....	17
3.1.2 Caracterización del Canal Radio	18
3.2 Sistema de Medida.....	19
3.3 Software de Post-procesado.....	21
3.3.1 Función de transferencia.....	23
3.3.2 Capacidad	25
Capítulo 4. Resultados.....	32
4.1 Escenario de Referencia. Sala Multiusos.....	32
4.1.1 Entorno y Configuración	33
4.1.2 CDF de la Capacidad.....	36
4.1.3 Capacidad en función de la SNR.....	51
4.2 Salón de Actos	59
4.2.1 Entorno y Configuración	60
4.2.2 CDF de la Capacidad.....	65
4.2.3 Capacidad en función de la SNR.....	70
4.3 Conclusiones	74

Capitulo 5. Conclusiones y líneas futuras	75
5.1 Conclusiones	75
5.2 Líneas Futuras.....	75
Referencias	77
Anexos	79
Anexo 1. Código para calcular la CDF de la capacidad de canal.....	79
Anexo 2. Código para calcular y representar la capacidad en función de la SNR	82

Capítulo 1. Introducción

1.1 Sistemas 5G: motivación y características

Desde el despliegue y puesta en servicio de la así denominada primera generación (1G) de sistemas de comunicaciones móviles terrestres han pasado ya varias décadas; hasta llegar a la actualidad donde la tecnología de quinta generación (5G) es ya una realidad, cada vez más presente en el día a día. Esta evolución tecnológica abarca desde los ya obsoletos sistemas 1G de naturaleza analógica y donde su razón de ser eran las comunicaciones de voz, hasta los sistemas actuales, donde la voz queda en un segundo plano y los nuevos servicios multimedia como el vídeo en streaming o los videojuegos y otras aplicaciones en tiempo real adquieren el protagonismo. Estos nuevos escenarios de uso de la tecnología plantean nuevos retos tecnológicos, generando un gran desafío para desarrolladores y operadores móviles, debido al incremento del tráfico y datos a gestionar, el aumento de las velocidades en las células y la baja latencia que se requiere [1].

Si ponemos en números el mencionado aumento en el tráfico móvil, se prevé que desde 2017 a 2022 el tráfico móvil aumente un 46% anualmente, pasando de los 12 Exabytes mensuales en 2017 a los 77 en 2022. Este tráfico vendrá generado principalmente por los smartphones, que aportarán en torno al 93% del tráfico móvil global en 2022 [2].

Pero no solo el aumento del tráfico de los dispositivos móviles va a ser uno de los desafíos que va a tener que afrontar la nueva generación de sistemas de comunicaciones móviles. Otro aspecto fundamental va a ser el aumento en el número de dispositivos conectados, en línea con las previsiones que se muestran en la Figura 1, [2]. Este aumento va a venir de la mano del crecimiento de la tecnología M2M (Machine to Machine) que supondrán casi un tercio de los dispositivos conectados en 2022. Para poner en contexto este aumento, los dispositivos M2M pasarán de representar el 11% de las conexiones en 2017 al 31% en 2022, con un aumento interanual del 32% en este período de tiempo.

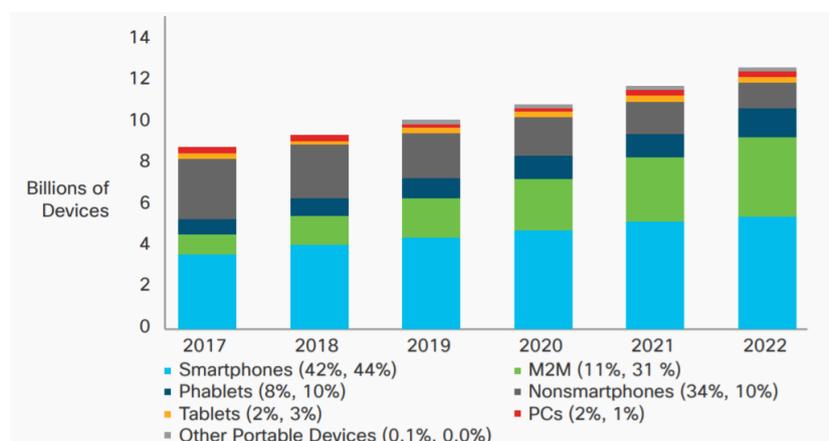


Figura 1. Evolución del número de conexiones móviles. *Fuente:* [2]

Se pueden entonces definir los principales pilares en torno a los cuales deberá articularse el despliegue de la nueva tecnología 5G de comunicaciones móviles, como son el aumento del tráfico que se espera para estos próximos años o el crecimiento en el número de dispositivos que van a hacer uso de las redes, pero ¿Qué características va a tener que cumplir una red para ser considerada de quinta generación? Estas especificaciones, que forman parte del estándar de la tecnología 5G, serán fijadas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) en el documento IMT-2020. Este documento se espera que esté finalizado en su última versión a lo largo de 2020 [3]. Algunos de estos aspectos ya fueron recogidos en la recomendación ITU-R M.2083 publicada en 2015.

En las siguientes líneas se presentan algunas de las características funcionales que deberán contemplar los nuevos sistemas, de acuerdo con la tecnología 5G [4]:

- Velocidad máxima Downstream soportable: 20 Gbps
- Velocidad máxima en el Uplink soportable: 10 Gbps
- Velocidad de Downstream en escenarios urbanos el 95% del tiempo: 100 Mbps
- Velocidad en el Uplink en escenarios urbanos el 95% del tiempo: 50 Mbps
- Latencia inferior a 1 ms
- Máxima velocidad de desplazamiento del dispositivo móvil: 500 km/h
- Densidad máxima de dispositivos: $10^6/\text{km}^2$

En la Figura 2 se muestran de forma gráfica las características expuestas en el párrafo anterior para los sistemas 5G y el salto tecnológico requerido con respecto a los actuales sistemas de cuarta generación (4G), cuyas especificaciones quedan recogidas en la UIT en el marco de IMT-advanced.

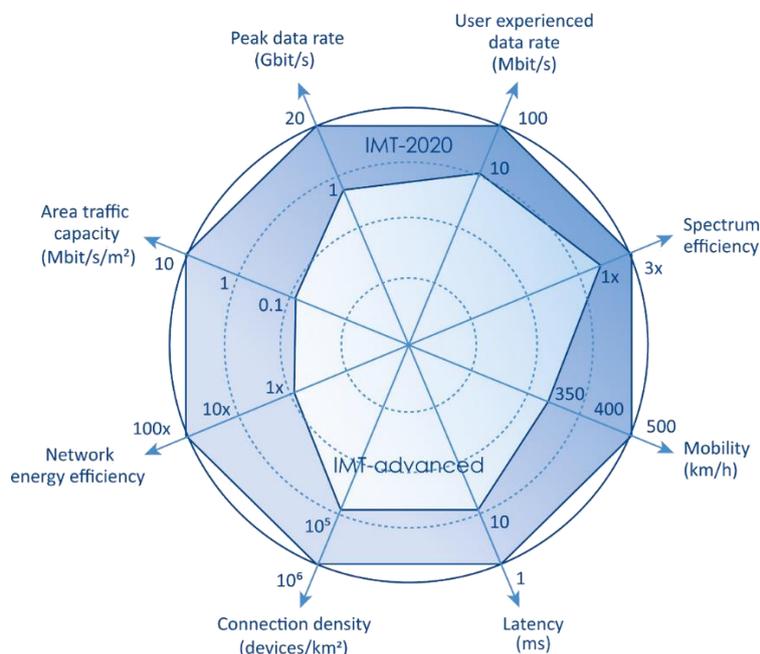


Figura 2. Comparativa entre las especificaciones propuestas para los sistemas 5G (IMT-2020) y 4G (IMT-advanced). Fuente: ITU-R M.2083

Como en otros sectores, el avance tecnológico en los sistemas de comunicaciones móviles nace amparado por la definición previa de unos escenarios de uso en torno a los cuales albergar y justificar dicho desarrollo tecnológico. En el caso de los sistemas de quinta generación, la UIT en la recomendación ITU-R M.2083 estableció los diferentes escenarios de uso que deberá atender la tecnología 5G tras su implementación. En este sentido, a continuación se presentan, de forma resumida, los tres escenarios de uso contemplados:

- eMBB (Enhanced Mobile Broadband): este escenario viene definido por la alta tasa de transferencia de datos requerida, siendo estos datos generados por una gran densidad de usuarios distribuidos a lo largo de la celda. En este escenario se requerirá que la velocidad percibida por el usuario sea elevada, alcanzando las velocidades mencionadas anteriormente para el 95% del tiempo, pudiéndose alcanzar grandes velocidades de pico cuando la demanda lo permita. Para conseguir un escenario óptimo donde se cumplan los requerimientos descritos, se deberá lograr una alta eficiencia espectral. La mencionada recomendación de la UIT también recoge que estas redes deberán ser energéticamente eficientes.
- mMTC (Massive Machine-type Communications): escenario centrado en el internet de las cosas (IoT), donde la elevada densidad de conexiones simultáneas será el mayor desafío, ya que se registrarán un gran número de dispositivos de bajo consumo conectados a la misma red y de manera simultánea.
- URLLC (Ultra-reliable and Low Latency Communications): escenario donde la importancia recaerá en el logro de la mínima latencia, permitiendo una alta movilidad de los dispositivos. Este escenario estará orientado a aplicaciones críticas que requieran una alta fiabilidad.

1.2 Canal Radio

En la planificación de un sistema de radiocomunicación, al no utilizar ondas guiadas, la caracterización del canal radio es de gran importancia. En concreto, en los sistemas de comunicaciones móviles celulares el canal se comporta como un medio altamente dispersivo, y cuyo conocimiento juega un papel decisivo en su estudio y planificación.

Como ya se ha mencionado en la sección anterior, uno de los puntos primordiales en torno a los cuales se articula la 5G y que viene recogido en [4], es la necesidad de mejorar la eficiencia espectral con respecto a los sistemas de cuarta generación. Para lograr esa mejora en la eficiencia espectral en un factor $3\times$, tal y como se propone, va a ser necesario utilizar el espectro disponible de manera óptima, lo cual no sería posible sin la correcta caracterización del canal radio [5].

Por otra parte, la tecnología MIMO (Multiple Input Multiple Output) será uno de los pilares fundamentales del 5G, permitiendo lograr los altos requerimientos propuestos en esta quinta generación de comunicaciones móviles y maximizando la eficiencia espectral. Es muy importante la caracterización 3D del canal radio para este tipo de sistemas MIMO avanzados [6], donde la propagación multicamino y su correcta caracterización adquiere un papel esencial. La caracterización precisa del canal radioeléctrico nos ayudará a

conocer sus limitaciones y a explotar las oportunidades que nos pueden ofrecer las diferentes bandas de frecuencias de interés.

La tecnología 5G propone la utilización de nuevas bandas de frecuencias, algunas de ellas muy elevadas, muy por encima de los 6 GHz, buscando esquivar las bandas inferiores que se encuentran congestionadas con otros tipos de servicios. Esta congestión en las bandas que venían utilizándose tradicionalmente para las tecnologías móviles hace más complicado el alcanzar las altas velocidades propuestas para la tecnología 5G. Esto impulsa a la industria a buscar nuevas bandas con más espectro libre disponible. Todo ello sin dejar de lado las tecnologías precedentes al 5G ya que, como se menciona en [7], se debe asegurar la compatibilidad de la nueva tecnología con las tecnologías predecesoras.

Se han realizado y se siguen realizando muchos estudios en bandas de frecuencia elevadas, por encima de los 6 GHz [7], centrándose este rango de frecuencias en celdas de menor tamaño, conocidas como pico-celdas, debido a la mayor atenuación que se produce al subir en frecuencia.

Sin embargo, a corto plazo se prevé el despliegue más generalizado de la tecnología 5G en bandas de frecuencias más bajas, considerándose la de 3.5 GHz como la principal para acometer el despliegue temprano de la tecnología en Europa [8].

En el caso concreto de España, la banda de 3.6–3.8 GHz se ha liberado de su anterior uso para televisión para su posterior subasta [9] y licitación entre los operadores móviles para la implantación de la tecnología 5G. En la Tabla 1 puede apreciarse un resumen de la subasta realizada con el licitador ganador y el precio pagado por el ancho de banda obtenido.

Tabla 1. Resumen subasta espectro 3600 – 3800 MHz. *Fuente [9]*

Licitador	Ancho de Banda	Precio
Orange Espagne S.A.U.	60 MHz	132.044.533,56 €
Telefónica Móviles España S.A.U.	50 MHz	107.462.458,60 €
Vodafone España S.A.U.	90 MHz	198.141.528,48 €

Este Trabajo Fin de Máster (TFM) se va a centrar en el análisis y caracterización del canal radio en la banda de 3.5 GHz, siendo esta banda una de las más prometedoras a corto plazo para el despliegue de la tecnología 5G en Europa.

1.3 Objetivos

El objetivo de este TFM es contribuir a la caracterización de canales MIMO masivo en entornos de interiores apoyándose en técnicas de trazado de rayos y centrando el estudio en la banda de 3.5 GHz.

Se pretende demostrar la eficacia que proporciona la herramienta CINDOOR, basada en el trazado de rayos, a la hora de caracterizar canales MIMO masivos. Para ello, se

compararán las capacidades de canal obtenidas mediante campañas de medida ya existentes y realizadas en un entorno real, con los valores de capacidad obtenidos en las simulaciones con CINDOOR en el mismo entorno, demostrando así la eficacia y utilidad de esta herramienta.

Este documento se organiza en 5 capítulos diferenciados, siendo este capítulo introductorio el primero de ellos. En el siguiente capítulo se tratará la caracterización del canal radio, centrándonos en el MIMO masivo y sus parámetros de interés.

Posteriormente se explicará la utilización del trazado de rayos para la caracterización del canal radio utilizándose la herramienta CINDOOR para la simulación de los entornos propuestos.

Se expondrá la campaña de medidas realizada que servirá como punto de comparación con los resultados obtenidos mediante las simulaciones realizadas con CINDOOR.

A su vez, se explicará el procesado de los datos obtenidos, tanto de las medidas como de las simulaciones, para su posterior representación y estudio de los resultados.

El cuarto capítulo se dedica a la presentación y discusión de los resultados obtenidos, centrandó el estudio en la capacidad de canal, realizando una comparativa en un primer entorno de referencia entre medidas y CINDOOR. Posteriormente, una vez validada la herramienta de simulación, se plantea repetir el estudio en un segundo entorno mucho más complejo, donde no se contempla por su dificultad realizar medidas, y se analizan los resultados obtenidos mediante las simulaciones de CINDOOR.

Para finalizar, en el último capítulo se incluyen las principales conclusiones del trabajo y las posibles líneas futuras que pueden dar continuidad al TFM realizado.

Capítulo 2. Caracterización del canal radio: MIMO masivo

En este capítulo se van a presentar los principios que subyacen bajo el concepto de MIMO masivo, describiendo la técnica y los parámetros de interés que serán utilizados en capítulos posteriores para proceder a la caracterización del canal radio.

2.1 Introducción a MIMO

El aumento en los requerimientos de tráfico en las tecnologías inalámbricas plantea un gran reto para el futuro cercano, no habiendo una solución sencilla y única que permita el aumento de la capacidad para cumplir con los requisitos establecidos por la UIT para la tecnología 5G.

Se pueden plantear tres puntos de estudio para la mejora de la eficiencia espectral en las comunicaciones inalámbricas, [10]: 1) utilización del espectro libre o infrautilizado; 2) despliegue de más puntos de acceso o células cubriendo áreas cada vez más pequeñas que desemboquen en los despliegues ultra densos de red y 3) utilización de nodos o estaciones base y terminales móviles que cuenten con múltiples antenas.

En el capítulo anterior ya se han tratado brevemente los 2 primeros puntos al mencionar la utilización de bandas de frecuencias elevadas propuesta por la UIT [4]. En este sentido, si se pretende aprovechar el espectro radioeléctrico libre disponible en frecuencias por encima de los 6 GHz [7], la utilización de estas nuevas bandas de frecuencia también llevaría aparejado el despliegue de más células/transmisores debido a la menor cobertura que se consigue con las ondas milimétricas. Este TFM va a centrarse en el tercero de los puntos mencionado en el párrafo anterior, la utilización de múltiples antenas para mejorar la capacidad y por tanto la eficiencia espectral obtenible que nos puede proporcionar el canal radio. Se considera entonces la capacidad como la eficiencia espectral máxima que se podría llegar a obtener en un canal determinado.

El término MIMO es el acrónimo inglés de Multiple-Input Multiple-Output, refiriéndose a la utilización de múltiples antenas en transmisión (Multiple Input) y recepción (Multiple Output). La primera tecnología MIMO que apareció fue la MIMO Point-to-Point, que posteriormente fue evolucionando hasta llegar a la MIMO Multi-User de la que ha surgido el massive MIMO, que será el foco principal de estudio de este trabajo.

2.1.1 Point-to-Point MIMO

Los sistemas MIMO punto a punto cuentan con M antenas en el transmisor y K antenas en recepción como puede apreciarse en la Figura 3. Estos sistemas se consideran point-

to-point ya que cada usuario dispone de un bloque tiempo-frecuencia que será utilizado en la transmisión y recepción de los datos entre ese único usuario y la estación base. Por lo tanto, el bloque de tiempo-frecuencia que se dispone será utilizado por un único usuario, lo cual convierte al sistema en una comunicación punto a punto entre usuario y estación base.

Esto no indica que el sistema no sea capaz de trabajar con más de un usuario, sino que la comunicación con cada uno de ellos será punto a punto, asignándole un bloque frecuencia-tiempo diferente a cada uno de los usuarios. Estas asignaciones tiempo frecuencia se realizan mediante las técnicas de multiplexación en el tiempo y la frecuencia.

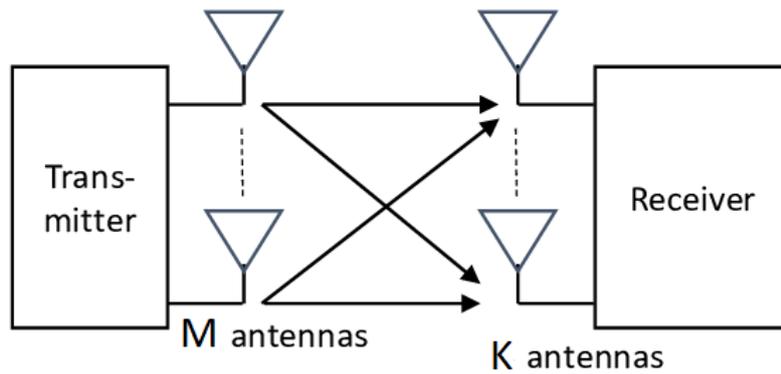


Figura 3. Sistema Point-to-Point MIMO con M antenas en transmisión y K antenas en recepción.

Una primera aproximación a la capacidad expresada en bits/s/Hz que puede proporcionarnos un sistema MIMO punto a punto, viene dada en (1). Asumiendo que la relación señal ruido (SNR) ρ_d en el receptor es suficientemente elevada [10]:

$$C \propto \min(M, K) \log_2(\rho_d), \quad \rho_d \gg 1 \quad (1)$$

De esta expresión podemos deducir que, mediante el aumento del número de antenas en transmisión y recepción, la capacidad puede ser incrementada para una misma relación señal a ruido. Otro aspecto importante que se desprende de (1) es que la capacidad en estos sistemas viene limitada por el mínimo número de antenas entre el transmisor (M) y el receptor (K), por lo que para sistemas MIMO punto a punto no es de gran utilidad la colocación de más antenas en uno que en otro dispositivo, siendo óptimo la utilización del mismo número de antenas en el transmisor y en el receptor cuando la relación señal a ruido es elevada.

El siguiente paso natural al que nos lleva el estudio de la capacidad en estos sistemas es al teorema de Shannon. En (2) se expresa la capacidad de un canal donde el ruido en recepción es de tipo Gaussiano complejo y el receptor es conocedor del canal.

$$C = \log_2 \det \left(I_K + \frac{\rho_d}{M} G_d^H G_d \right) = \log_2 \det \left(I_M + \frac{\rho_d}{M} G_d G_d^H \right), \quad (2)$$

En (2), G_d es una matriz de dimensiones $M \times K$ que denota la respuesta frecuencial del canal transmisor-receptor. La matriz I_K hace referencia a la matriz identidad de dimensiones $K \times K$ y el superíndice H indica la operación transpuesta conjugada.

La expresión mostrada en (2) describe la capacidad en el enlace descendente (DL) en un sistema con M antenas transmisoras y K antenas receptoras. En el caso de querer obtener la capacidad de subida del mismo enlace, bastaría con cambiar las M antenas transmisoras por K , además de la relación señal a ruido que sería la del enlace ascendente (UL) de subida ρ_u y la respuesta frecuencial del canal ascendente G_u .

Como se ha mencionado previamente, para alcanzar la capacidad descrita por Shannon es necesario que el receptor conozca el canal, de este modo el receptor podrá recuperar la información transmitida de forma óptima. Para que el receptor sea capaz de calcular la matriz del canal se propone la utilización de pilotos o señales de entrenamiento. Estas señales serían conocidas por el receptor gracias a lo cual podría obtener una estimación del canal que dicho piloto ha atravesado antes de ser recibido.

Los sistemas MIMO punto a punto son propuestos en ciertos estándares comerciales, como por ejemplo el IEEE 802.11ac [11]. Este estándar especifica que el número máximo de antenas no puede superar las 8 en transmisión y en recepción. El motivo por el cual el número de antenas está limitado a 8 es la baja escalabilidad que proporciona la tecnología MIMO punto a punto. Las principales razones por las que se limita a 8 el número de antenas en la tecnología 801.11ac se describen a continuación [10]:

- El canal radio puede que no soporte 8 flujos de datos diferentes. Esto se debe a la falta de componentes multicamino del canal, por ejemplo, en situaciones con una fuerte componente de visión directa (LOS).
- El aumento en el número de antenas también conlleva un aumento en el tiempo que necesita el receptor para calcular la matriz del canal mediante el entrenamiento a base de pilotos.
- Con las bajas relaciones señal a ruido presentes en el borde de la celda, la relación (1) deja de cumplirse y la ganancia por multiplexado espacial baja drásticamente del $\min(M, K)$. La capacidad que se puede alcanzar en estas circunstancias viene descrita por (3), [12].

$$C_{\rho \rightarrow 0} \approx \frac{\rho \cdot \text{Tr}(GG^H)}{M \ln 2} \approx \frac{\rho K}{\ln 2} \quad (3)$$

La capacidad es independiente del número de antenas transmisoras e incluso bajo las condiciones de propagación más favorables se pierde la ganancia de multiplexado. En consecuencia, puede concluirse que para condiciones de baja SNR la utilización de múltiples antenas transmisoras deja de ser beneficiosa.

- Los dispositivos móviles requieren de una cadena de RF independiente para cada una de las antenas, lo cual aumenta mucho la complejidad de los mismos.

Por todos estos motivos, el Point-to-Point MIMO está considerada una tecnología no escalable. En la siguiente sección trataremos el sistema MIMO multiusuario que mejora algunos de los puntos débiles descritos para la tecnología MIMO punto a punto.

2.1.2 Multi-User MIMO

Los sistemas MIMO punto a punto ofrecen una ganancia de multiplexado muy buena, como se expuso en (1), para entornos favorables donde la SNR es elevada. Pero el valor de la SNR puede ser bajo debido a situaciones muy comunes donde el terminal de usuario se sitúa al borde de la celda. Estas situaciones de baja SNR reducen drásticamente la ganancia de multiplexado que nos pueden ofrecer los sistemas MIMO punto a punto.

Los sistemas MIMO multiusuario, conocidos en la literatura como multi-user MIMO, separan el array de K antenas en el terminal de usuario del MIMO punto a punto en K usuarios con una única antena independiente. Se puede observar la diferencia entre ambos sistemas comparando las Figuras 3 y 4. En esta sección vamos a tratar el supuesto de una estación base que cuenta con M antenas dando servicio a K usuarios independientes, cada uno de ellos con una única antena.

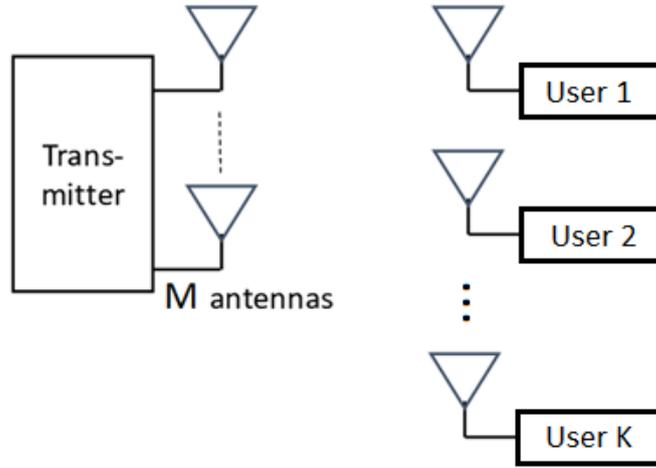


Figura 4. Sistema Multi-User MIMO con M antenas en transmisión y K usuarios con una antena receptora.

Existen dos diferencias principales entre los sistemas MIMO multiusuario y los punto a punto [12]. En los sistemas MIMO multiusuario los terminales, o antenas, se encuentran separados entre sí por distancias superiores a varias longitudes de onda. Otra característica que distingue a los sistemas multiusuario es que los terminales no colaboran entre sí ni en la transmisión ni en la recepción de datos.

En primer lugar se analizará el UL, donde en cada uso de canal los K usuarios transmitirán un vector de dimensiones $K \times 1$ de símbolos QAM que llamaremos q_u y el array de antenas en la estación base recibirá un vector $M \times 1$ que denotaremos como x_u :

$$x_u = \sqrt{\rho_u} G q_u + w_u \quad (4)$$

En (4), w_u es un vector $M \times 1$ que representa el ruido en el receptor siguiendo una distribución $CN(0,1)$.

Asumiendo que la estación base conoce el canal, la capacidad del UL en un sistema MIMO multiusuario no es menor que la que se obtendría si los terminales colaborasen entre ellos, tal que:

$$C_{sum_u} = \log_2 \det \left(I_K + \frac{\rho_u}{K} G_u^H G_u \right) \quad (5)$$

Como se aprecia en (5), se alcanza la misma capacidad que la descrita para el sistema MIMO punto a punto en (2).

En cuanto al DL, la estación base transmitirá un vector, s_d , de dimensiones $M \times 1$ a cada uno de los usuarios, y los usuarios recibirán en su conjunto un vector $K \times 1$ que denotaremos como x_d :

$$x_d = \sqrt{\rho_d} G^T s_d + w_d \quad (6)$$

siendo w_d el vector de ruido de tamaño $K \times 1$ que sigue una distribución $CN(0,1)$.

La ecuación de Shannon para la capacidad suma en el DL requiere del conocimiento del canal tanto en los terminales de usuario como en la estación base. En este caso la estación base debe conocer todos los canales y cada usuario solo el suyo con la estación base. La ecuación propuesta en (7) requiere de la solución de un problema de optimización convexo:

$$C_{sum_d} = \sup_a \{ \log_2 \det(I_M + \rho_d G_d D_a G_d^H) \}, \quad a \geq 0, \mathbf{1}^T a = 1 \quad (7)$$

Donde la matriz D_a es diagonal con los elementos del vector $M \times 1$, a , comprendidos en su diagonal.

Comparando este resultado con el obtenido en el sistema MIMO punto a punto podemos observar que la capacidad ofrecida en (7) es superior a la expresada en (2). Para alcanzar valores cercanos a esta capacidad teórica se debe aplicar el llamado *dirty paper coding*, cuyo éxito recae en la correcta y precisa estimación del canal mediante pilotos, como sucedía en el MIMO punto a punto.

Como extensión a las desventajas previamente comentadas para los sistemas MIMO punto a punto, a continuación se resumen las mejoras que introducen los sistemas multiusuario y que sirven para mejorar varios puntos débiles de los sistemas MIMO punto a punto [10]:

- Menor dependencia del entorno de propagación, debido a la mayor distancia entre usuarios, evitando así la caída drástica en la ganancia de multiplexado sufrida por los sistemas punto a punto cuando la SNR era baja.
- La utilización de una única antena en los terminales de usuario reduce mucho la complejidad de aquellos.

2.2 Massive MIMO

Uno de los aspectos más prometedores de la tecnología Massive MIMO y que la distingue de las anteriormente mencionadas es la escalabilidad de la misma, pudiéndose añadir tantas antenas como se desee, siendo esto siempre beneficioso para el rendimiento del sistema. Se consigue con esta tecnología reducir la potencia necesaria, logrando un mejor servicio a lo largo de toda la celda y simplificando el procesado de las señales. En los sistemas de MIMO masivo, el número de antenas que se emplean en las estaciones base es varias veces superior al número de usuarios de la celda a la que esta estación base pretende dar servicio [13].

El MIMO masivo surge a partir del MIMO multiusuario como una tecnología más avanzada y útil en el ámbito práctico. Massive MIMO a diferencia de otras tecnologías estudiadas anteriormente, no se apoya en la multiplexación por división en el tiempo o en la frecuencia, sino que los diferentes bloques de datos comparten frecuencia y tiempo. Massive MIMO utiliza la multiplexación por división espacial.

Uno de los puntos clave que convierten a esta tecnología en escalable es la utilización de estimaciones directas del canal radio para realizar la multiplexación y demultiplexación de las señales, no se utilizan hipótesis a priori de cómo es el canal. Esta utilización de las medidas del canal concreto para la multiplexación y la utilización de un gran número de antenas permite a los sistemas de MIMO masivo gozar de la capacidad denominada *Beamforming* [12].

Beamforming es la capacidad de aprovechar la multiplexación espacial para enviar las señales al usuario por el camino más eficiente. En un entorno con línea de visión directa esto significaría que el array de antenas emitiría hacia la posición donde se localiza el usuario. En entornos más complejos, donde los componentes dominantes no son los de la línea de visión directa, este concepto de *beamforming* es más complejo. En estos entornos el *beamforming* no tiene por qué centrarse en el receptor directamente, sino en encontrar el multicamino que aporte una mejor respuesta constructiva.

Como en apartados previos, vamos a estudiar tanto el enlace descendente como el ascendente, mencionando alguna técnica de codificación aplicable en ambos enlaces. Luego nos centraremos en la importancia de estimar correctamente el canal radio para concluir con el análisis del rendimiento, presentado las ecuaciones en las que nos apoyaremos para la caracterización del canal radio en futuros capítulos.

2.2.1 Codificación

Como se ha mencionado previamente, los sistemas massive MIMO utilizan la multiplexación espacial. Por este motivo el papel de la codificación y decodificación de la señal es fundamental para lograr el rendimiento esperado.

Se va a estudiar en primer lugar el UL, donde los usuarios transmitirán símbolos QAM de manera simultánea y a la misma frecuencia, el único procesado que podría aplicarse en la transmisión por parte de los usuarios sería el control de potencia.

Para explicar cómo funciona la decodificación de señales en el UL en sistemas de MIMO masivo vamos a utilizar el ejemplo del filtro adaptado, también denominado Maximum Ratio Combining (MRC). En la Figura 5 puede observarse un esquema del funcionamiento sobre el que nos vamos a apoyar para su explicación.

Cada antenna de la estación base observa un canal diferente con cada usuario denotado por g_{mk} . Asumiendo que la estación base ha estimado todos los canales, para la recuperación de la señal enviada por el usuario se multiplicaría la señal recibida por cada antenna por el complejo conjugado del canal estimado. Posteriormente se sumarían las contribuciones de cada una de las antenas, obteniendo como resultado la estimación de la señal transmitida por el usuario k-ésimo, \hat{q}_k .

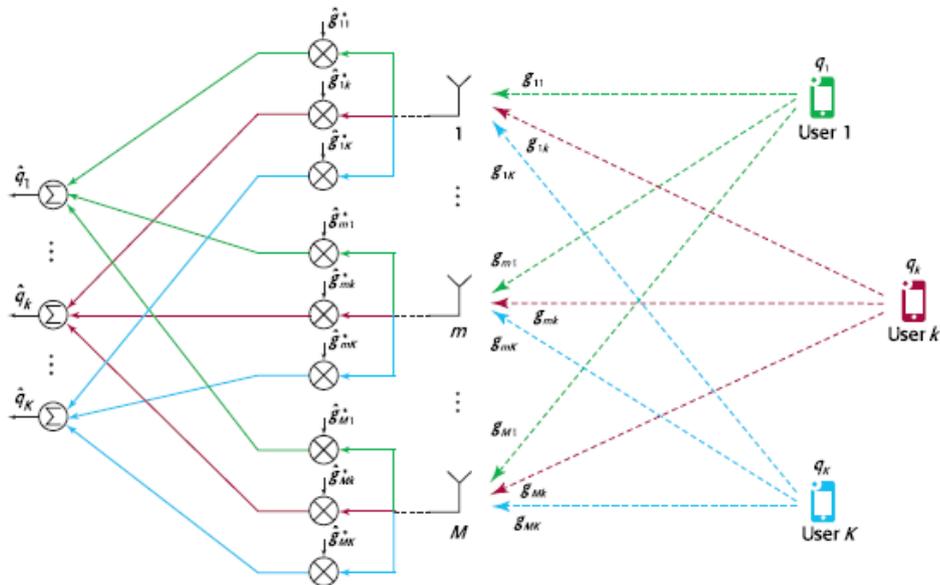


Figura 5. Decodificación mediante filtro adaptado. Fuente: Bell Labs Technical Journal

En el DL, la precodificación más simple que se puede aplicar es la denominada *Conjugate Beamforming* [10], expuesta gráficamente y de forma descriptiva en la Figura 6. Es una precodificación lineal donde se asigna un peso a cada señal transmitida en cada antenna, que será el complejo conjugado del canal estimado, es decir, es una operación totalmente simétrica al filtro adaptado en recepción. Cada antenna de la estación base transmitirá todos los símbolos para cada uno de los usuarios, escalados de manera conveniente. Esta codificación asegurará que los símbolos correspondientes a cada usuario transmitidos por cada una de las antenas lleguen en fase al usuario receptor.

Existen otros precodificadores que trabajan de forma diferente, ya que a diferencia del *Conjugate Beamforming*, que trata de maximizar la recepción de la señal deseada por cada usuario, buscan también anular la interferencia multiusuario. Un ejemplo de este tipo de precodificadores, siendo uno de los más populares, es el *Zero Forcing* (ZF).

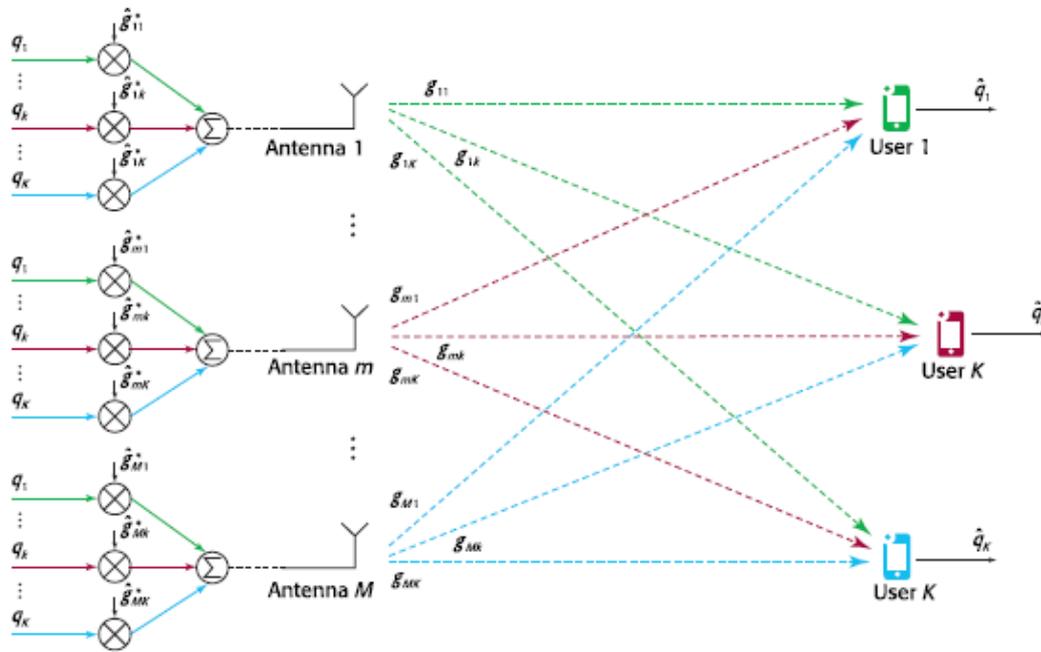


Figura 6. Conjugate Beamforming. *Fuente: Bell Labs Technical Journal*

El precodificador ZF aplicará pesos a las señales interferentes, de tal manera que la suma de éstas en el receptor sea cero. Al igual que en el *conjugate beamforming* una estimación de canal precisa es fundamental para lograr un funcionamiento óptimo del sistema. En la próxima sección se tratará más en profundidad la estimación de canal para los sistemas massive MIMO.

2.2.2 Estimación del Canal Radio

Como se ha mencionado a lo largo de esta sección, la tecnología de MIMO masivo se sustenta sobre la correcta estimación del canal radio. En sistemas massive MIMO donde la estación base cuenta con un array con un gran número de antenas, la estación base debe estimar el canal a partir de los usuarios activos en la celda [13]. Es decir, que los diferentes usuarios deben transmitir señales piloto en el UL que permitan a la estación base estimar el canal.

En sistemas con arrays de muchas antenas se utilizan pilotos sobre TDD para la estimación de canal [12], donde la estructura temporal de transmisión de datos y pilotos sería la representada en la Figura 7.



Figura 7. Estructura temporal en un sistema MIMO TDD para la estimación de canal. *Fuente: [10]*

Los pilotos que son transmitidos en el UL por los usuarios son secuencias ortogonales [13], y suponiendo la respuesta frecuencial constante durante N_{coh} subcarriers, serían necesarios K/N_{coh} slots temporales. Por lo tanto, cuantos más usuarios haya en la celda más tiempo será necesario dentro de la trama temporal para el envío de pilotos.

Esto muestra que la limitación de usuarios en sistemas massive MIMO viene dada por el tiempo requerido para la estimación de canal, ya que podría suceder que el número de usuarios aumentase hasta el punto que el tiempo dentro de la trama para la transmisión de pilotos ocupase todos los slots temporales, no habiendo tiempo para la transmisión de datos. En este tipo de sistemas no se debería emplear más de la mitad de los slots para el envío de señales piloto [10].

2.2.3 Rendimiento de un sistema Massive MIMO

En esta sección se van a exponer las expresiones matemáticas que posteriormente serán utilizadas para la caracterización del canal radio tanto en medidas como simulaciones de los entornos propuestos en las siguientes secciones. Las expresiones propuestas son aplicables al estudio del UL en un sistema de MIMO masivo.

Se asume un escenario donde la estación base cuenta con M antenas y en la celda hay K usuarios activos, cada uno de ellos con un terminal de una sola antena. La estación base conoce el canal y los usuarios no colaboran entre sí, como ya hemos mencionado que sucede en los sistemas de MIMO masivo. Para el análisis se considerará un sistema OFDM con N_f subportadoras [14].

Teniendo en cuenta los supuestos anteriores, podemos definir la señal recibida en la estación base para la subportadora i -ésima como:

$$x(i) = G(i) \cdot s(i) + w(i), \quad i = 1, 2, \dots, N_f \quad (8)$$

En (8), $x(i)$ es un vector de M elementos que representa la señal recibida por la estación base. La matriz $G(i)$ será la matriz del canal, de dimensiones $M \times K$ y $w(i)$ será el vector de ruido de M elementos que seguirá una distribución $CN(0,1)$.

Posteriormente, se puede normalizar la matriz del canal G de acuerdo con varias expresiones, se contemplan dos matrices de normalización J diferentes a partir de las cuales obtendremos la matriz G normalizada:

$$G = G' \cdot J \quad (9)$$

En la primera normalización propuesta, la matriz J será una matriz diagonal de dimensiones $K \times K$, donde sus elementos (j_q) vendrán definidos por:

$$j_q = \sqrt{\frac{M}{\frac{1}{N_f} \sum_{k=1}^{N_f} |g'_q[k]|^2}}; \quad q = 1, \dots, K \quad (10)$$

Los elementos de la diagonal de la matriz J toman diferentes valores de forma que todas las columnas de G tengan norma unidad. De esta forma se elimina la diferencia de potencia entre los distintos terminales de usuario. Puede interpretarse esta normalización como la implementación de un control de potencia ideal en el sistema.

La segunda normalización propuesta viene definida de forma que todos los elementos de la diagonal de la matriz J son idénticos, lo que convierte a (9) en la multiplicación de G' por un escalar:

$$j_q = \sqrt{\frac{MK}{\frac{1}{N_f} \sum_{k=1}^{N_f} |G'[k]|_F^2}}; \quad q = 1, \dots, K \quad (11)$$

A diferencia de la normalización anterior, con esta normalización se mantiene la diferencia de potencias recibidas de los diferentes terminales de usuario.

Considerando los supuestos expuestos previamente, la capacidad del canal vendría dada por la siguiente expresión:

$$C(i) = \sum_{k=1}^K \log_2 \left(1 + \frac{\rho}{K} \cdot \lambda_k \right), \quad i = 1, 2, \dots, N_f \quad (12)$$

donde λ_k es el autovalor k de la matriz $G^H G$ y ρ es la relación señal a ruido.

Capítulo 3. Caracterización del canal radio: trazado de rayos y análisis experimental

Este capítulo pretende describir la técnica de trazado de rayos para su aplicación a la caracterización del canal radio. En concreto, el núcleo central del capítulo versa sobre la utilización de la herramienta CINDOOR, un simulador para la planificación y diseño de sistemas inalámbricos en interiores, basado en el modelo de propagación GO/UTD.

Posteriormente, se explicará el sistema de medida empleado para llevar a cabo la caracterización experimental del canal radioeléctrico. En concreto, en este Trabajo Fin de Máster (TFM) se han utilizado los resultados de diversas campañas de medida ya existentes y realizadas por el grupo receptor, como base para establecer la comparación entre medidas y simulaciones.

En la última sección de este capítulo se presentará el software desarrollado para el post-procesado de los datos obtenidos con CINDOOR y su posterior representación. Se hará un especial hincapié en la contribución que desde este TFM se ha hecho a la mejora de la mencionada herramienta de post-procesado de los resultados.

3.1 Trazado de Rayos: CINDOOR

El objetivo de este TFM es la caracterización de canal radio mediante la técnica del trazado de rayos, demostrando el potencial que presenta esta técnica comparando los resultados obtenidos mediante la simulación con las medidas realizadas en un entorno de interior de referencia. La herramienta a utilizar para llevar a cabo las simulaciones es CINDOOR, una aplicación software desarrollada por el Grupo de Ingeniería de Sistemas, Antenas y Radiopropagación (GISAR) de la Universidad de Cantabria.

La herramienta CINDOOR se apoya en el modelo de propagación 3D GO/UTD, un modelo que combina la Óptica Geométrica (GO) y la Teoría Uniforme de la Difracción (UTD), a través de una aproximación de alta frecuencia.

En la sección 3.1.1 se definirá el modelo de propagación utilizado para la estimación de canal mediante la técnica del trazado de rayos, donde se describirán los principales mecanismos de acoplo: transmisión, reflexión y difracción. Cada uno de estos mecanismos de propagación llevará asociado su correspondiente rayo.

Uno de los aspectos fundamentales para la correcta aplicación del modelo GO/UTD es la capacidad de trazar los rayos que conectarán el transmisor con el receptor de manera rápida, teniendo en cuenta que el número de rayos en un escenario real es muy elevado.

El software CINDOOR utiliza una combinación de teoría de imágenes y partición binaria del espacio (BSP) para el trazado de rayos entre transmisor y receptor.

3.1.1 Modelo 3D GO/UTD

Los modelos de alta frecuencia basados en la óptica geométrica y teoría uniforme de la difracción proporcionan una herramienta muy potente para la caracterización de la propagación radioeléctrica.

El canal puede ser modelado teniendo en cuenta una serie de parámetros que contribuyen al campo electromagnético total, parámetros asociados con el medio físico en el que se analiza la propagación, y tales como la atenuación, transmisión, reflexión o difracción de las ondas [16]. Cada uno de estos fenómenos lleva asociado un rayo, y analizando la contribución de cada uno de estos mecanismos de acoplo entre transmisor y receptor, puede obtenerse una caracterización precisa del canal radio. Los diferentes rayos o contribuciones del multicamino que pueden ser considerados en CINDOOR como mecanismos de acoplo entre antenas son el rayo directo, reflejados (considerando un primer orden o reflexiones de orden superior), difractados y combinaciones de rayos reflejados-difractados o difractados-reflejados.

En la Figura 8 pueden apreciarse sobre una captura de pantalla de CINDOOR y para un escenario concreto, los principales mecanismos de acoplo entre el transmisor (T) y el receptor (R) que tendrán una importancia significativa en la potencia que llega a R y en la estimación posterior del canal radio. El escenario representado en la Figura 8 es muy sencillo y sólo se tiene en cuenta hasta la cuarta reflexión; aunque en secciones posteriores se mostrarán los escenarios de estudio, donde se podrá apreciar la gran cantidad de rayos que conectan T y R en escenarios más complejos.

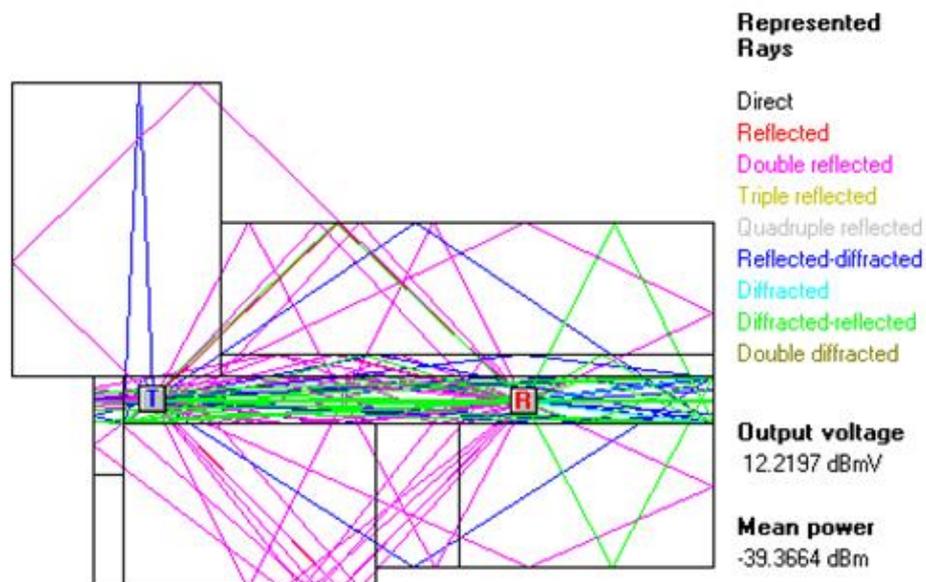


Figura 8. Captura de CINDOOR donde se representan los diferentes rayos en un escenario sencillo

Cada rayo lleva asociado un frente de onda cuya reflexión o difracción podrá ser caracterizada con la ayuda de las ecuaciones de campo electromagnético presentadas a continuación.

Definiendo $\bar{E}(Q_i)$ como el campo electromagnético en el punto Q_i , el campo electromagnético en el punto Q_s se define como:

$$\bar{E}(Q_s) = \bar{E}(Q_i)A(s)e^{-jks} \quad (13)$$

siendo s la distancia entre ambos puntos y $A(s)$ representa la amplitud asociada a la pérdida producida a esa distancia s . Por último, el término e^{-jks} indica la variación de fase sufrida entre ambos puntos, asociada con la distancia.

En (13) se puede incorporar la atenuación sufrida por la intersección de una placa en el modelo geométrico, obteniendo la ecuación del campo electromagnético resultante al atravesar una placa, tal que:

$$\bar{E}(Q_s) = \bar{E}(Q_i)\bar{T}(Q_t)A(s)e^{-jks} \quad (14)$$

En (14) se incorpora el término $\bar{T}(Q_t)$ que hace referencia a la matriz de transmisión en el punto Q_t , esta matriz incorpora parámetros como la polarización, el ángulo de incidencia o características electromagnéticas de la placa.

Una vez definida la atenuación sufrida al atravesar una placa, debemos mencionar otro de los principales mecanismos de acoplo, la reflexión sobre una placa. Se define el campo electromagnético tras la reflexión en una placa situada en el punto Q_r , a partir del campo incidente en la placa como:

$$\bar{E}(Q_s) = \bar{E}(Q_r)\bar{R}(Q_r)A'(s)e^{-jks} \quad (15)$$

donde la matriz de reflexión \bar{R} incorpora los cambios en polarización, magnitud y fase sufridos en la reflexión con la placa.

El último fenómeno de acoplo significativo es el de la difracción en aristas, donde el campo difractado puede definirse de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\bar{E}(Q_s) = \bar{E}(Q_d)\bar{D}(Q_d)A'(s)e^{-jks} \quad (16)$$

En (16), \bar{D} es la matriz de difracción, que al igual que la de reflexión y transmisión expuestas en (14) y (15) respectivamente, relaciona el campo electromagnético antes y después de interactuar con la placa. En este caso, el punto de la placa donde se produce la difracción se representa como Q_d .

3.1.2 Caracterización del Canal Radio

El modelo 3-D GO/UTD explicado previamente permite estimar de forma precisa y detallada el nivel de potencia o intensidad de campo en un punto de interés, así como extraer parámetros que permitan al diseñador analizar el comportamiento del canal radio. Entre estos parámetros destacan por su importancia el ancho de banda de coherencia, la

dispersión del retardo o root-mean square (RMS) delay spread, o la duración media de los desvanecimientos.

Así mismo, la utilidad de esta metodología a la hora de caracterizar canales MIMO como los que se pretenden analizar en este TFM, al tratar de estimar tanto la capacidad de canal como la matriz de correlación, ya se ha puesto de manifiesto en la literatura, [17].

Otra de las múltiples aplicaciones que nos ofrece CINDOOR es la capacidad de obtener mapas de cobertura detallados en interiores, donde se representa el nivel de potencia recibida en cada uno de los puntos del área de estudio. Un ejemplo de mapa de cobertura puede apreciarse en la Figura 9, donde se asigna un color a cada rango de potencias recibidas. Esta aplicación es de gran utilidad a la hora analizar coberturas y acometer la planificación de sistemas comunicaciones inalámbricas en interiores.

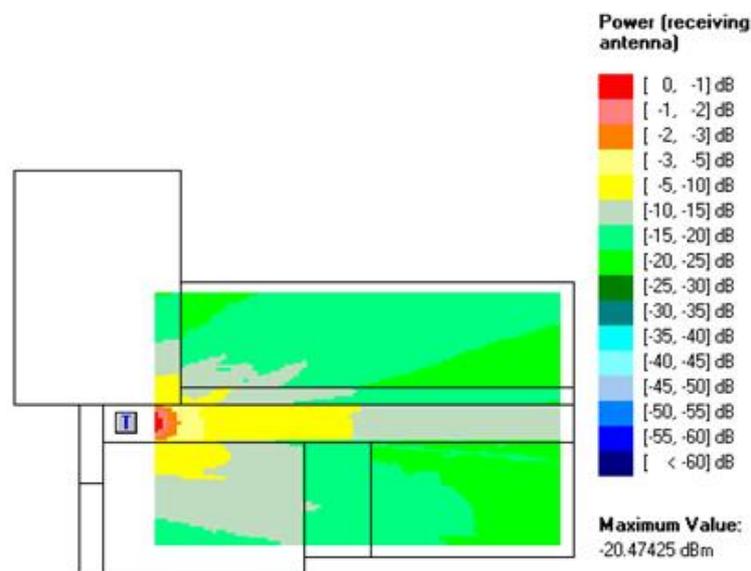


Figura 9. Mapa de cobertura de una estancia de ejemplo generado por la herramienta CINDOOR

Este TFM se centrará en el estudio y análisis de la capacidad del canal radio de interior. Los resultados que se incluirán en el documento están orientados a justificar, desde el punto de vista de la capacidad de canales MIMO indoor, el potencial y la validez de las técnicas de trazado de rayos. Para ello, se van a comparar las simulaciones realizadas con CINDOOR con los resultados de una campaña de medidas previamente realizada por el grupo GISAR utilizando el sistema de medida que se presenta a continuación, en la sección 3.2.

3.2 Sistema de Medida

En esta sección se pretende explicar brevemente el sistema que se emplea en las campañas de medida del canal radio, representando estos resultados de las medidas experimentales el punto de partida considerado en este TFM para compararlas con los resultados de las simulaciones llevadas a cabo con CINDOOR en los mismos escenarios.

En las campañas de medida del canal radio se utiliza el equipo que se muestra en la Figura 10. El sistema dispone de dos antenas que actuarán de transmisora y receptora en ambos extremos de la comunicación, dos motores encargados de realizar el posicionamiento de la antena receptora sobre un plano (imitando un array bidimensional virtual) y un analizador vectorial de redes que nos proporcionará las medidas del canal; todo ello controlado de forma remota desde un ordenador que será el encargado de sincronizar el movimiento de la antena receptora con la adquisición de la traza con información del parámetro S_{21} . Esta traza es la que representa a la función de transferencia del canal en cada punto de interés y en toda la banda de frecuencias medida.

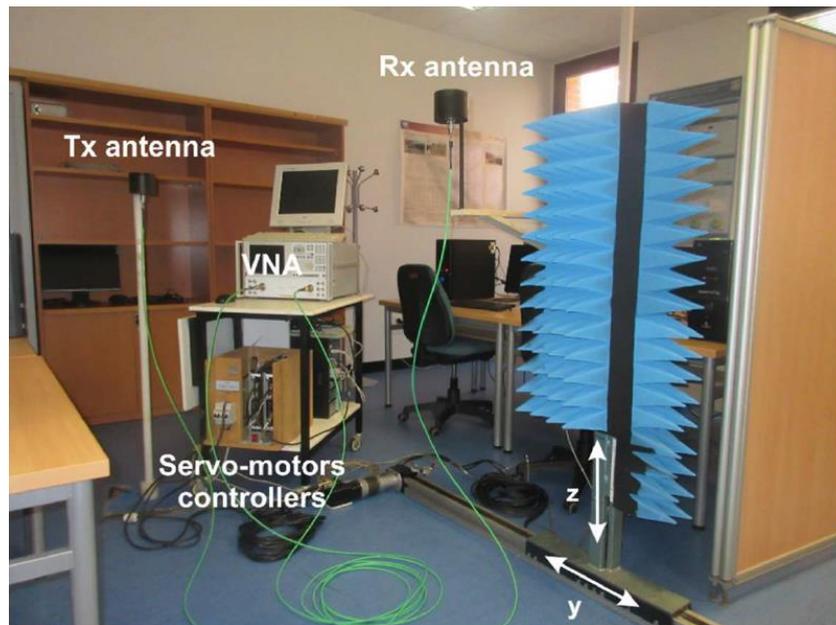


Figura 10. Sistema de medida del canal MIMO

El funcionamiento del sistema de medida es el que se explica a continuación: se realiza un barrido de las diferentes posiciones de estudio de la antena receptora manteniendo fija la antena transmisora. Para cada una de las posiciones del array virtual receptor se realiza una medida con el analizador de redes del parámetro $S_{21}(f)$, la cual nos proporciona una muestra de la función de transferencia compleja del canal, tal y como se expuso en el párrafo anterior. De esta forma, centrando el estudio en el UL, podemos obtener la caracterización del canal con un usuario transmisor y un array de antenas receptoras en la estación base.

El analizador vectorial de redes empleado es el modelo E8362A de Keysight Technologies, capaz de trabajar en el rango de frecuencias comprendido entre los 45MHz y los 20 GHz. En cuanto a las antenas, para la transmisión se optó por la EM-6865 de Electrometrics, una antena bicónica de banda ultra ancha que trabaja en el rango de 2 a 18 GHz y con un diagrama de radiación omnidireccional. Como antena receptora se eligió una antena sectorial, en concreto el modelo HG2458-08LP de L-Com, que abarca el rango de frecuencias de 2.3 a 6.5 GHz [6].

Para el estudio realizado se ha medido el parámetro $S_{21}(f)$ en la banda de 3.2-4 GHz, tomando $N_f = 641$ muestras frecuenciales equiespaciadas $\Delta f = 1.25$ MHz. En la Tabla 2 se presenta un resumen de la configuración que se empleó en el sistema de medida para realizar las medidas sobre el escenario utilizado como referencia en este TFM.

Tabla 2. Configuración del sistema de medida.

Rango de Frecuencia (GHz)	3.2 – 4.0
Resolución Frecuencial, Δf (MHz)	1.25
Potencia Transmitida (dBm)	7
Ancho Banda IF (KHz)	1
Separación entre elementos del array (mm)	50
Área escaneada (m ²)	0.2025
Tamaño del array virtual (posiciones de medida)	10×10 (100)
Tiempo de medida por posición Tx/Terminal Usuario (min)	17

3.3 Software de Post-procesado

En esta sección se describe el software que se utiliza para realizar el post-procesado de las simulaciones realizadas con CINDOOR, haciendo hincapié en los cálculos de capacidad, que es la principal contribución realizada en el marco de este TFM en este sentido. En concreto, en la primera subsección se describirá el tratamiento que se hace de los datos obtenidos de CINDOOR para obtener así la función de transferencia del canal; a continuación se dedicará una segunda subsección a mostrar el procedimiento de cálculo de la capacidad del canal a partir de la función de transferencia previamente obtenida. Se presentará el código generado, así como la interfaz gráfica propuesta.

El punto de partida ha sido un programa desarrollado en MATLAB que contaba con varias funcionalidades dedicadas al cálculo de diferentes parámetros útiles para el análisis del canal radio. A este programa se le ha añadido la capacidad de obtener la función de transferencia del canal a partir de las simulaciones previamente realizadas con CINDOOR, incorporando para ello sobre la interfaz que se muestra en la Figura 11 el botón resaltado en rojo.

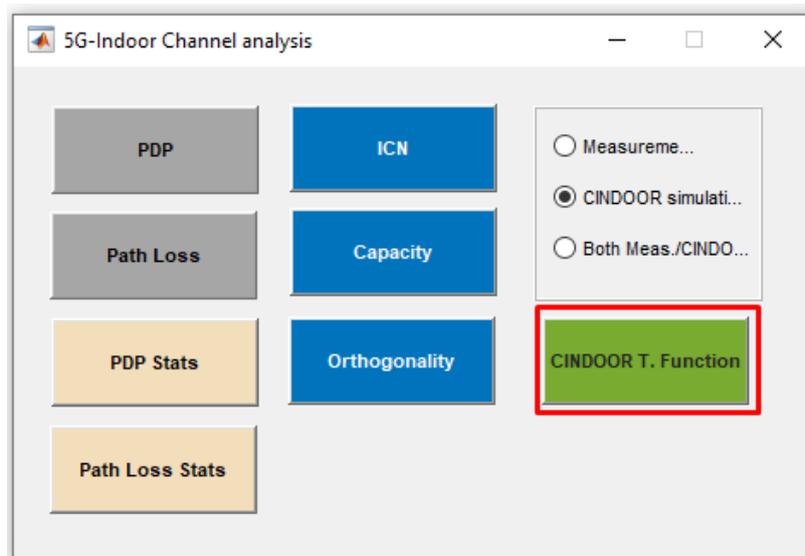


Figura 11. Interfaz principal del software de análisis del canal. Detalle del botón de acceso al cálculo de la función de transferencia del canal radio simulado

El botón resaltado en rojo en la Figura 11 se muestra únicamente cuando se selecciona *CINDOOR simulations* o *Both Meas./CINDOOR* como opción de procesamiento de los datos. Si la opción *Measurements* se encuentra seleccionada, entonces el análisis del canal se restringe al procesamiento de datos experimentales, y el botón permanecerá oculto. Esta mejora se realizó para incluir en el software la posibilidad de obtener la función de transferencia a partir de las simulaciones de CINDOOR.

La otra funcionalidad implementada es la del cálculo de la capacidad a partir de simulaciones de CINDOOR o la comparación de capacidad de simulaciones y medidas. Para acceder a estas funcionalidades se debe marcar en el menú derecho el tipo de dato a analizar y posteriormente pulsar en el botón *Capacity* resaltado en rojo en la Figura 12.

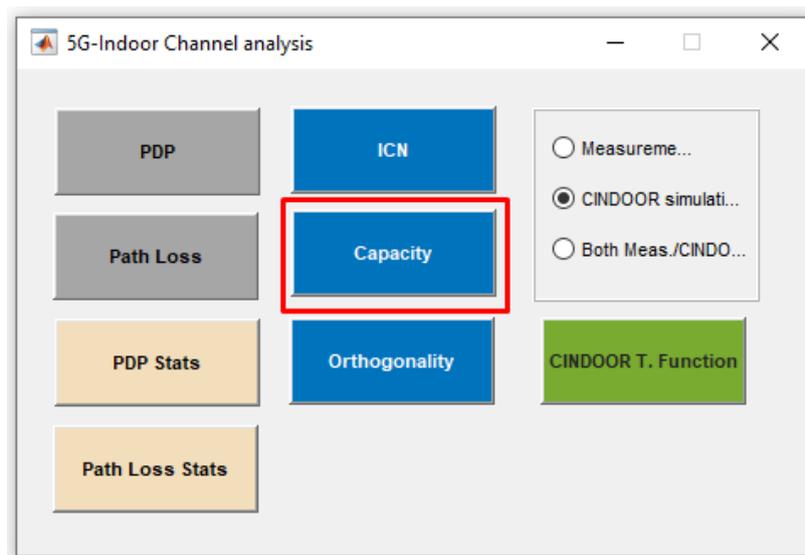


Figura 12. Interfaz gráfica software análisis de canal 5G. Botón de acceso a la funcionalidad de análisis de capacidad

A continuación, se procede a describir con más detalle cada una de las funcionalidades implementadas para, en posteriores secciones, realizar un análisis de los resultados obtenidos con el software generado.

3.3.1 Función de transferencia

Al pulsar en el botón *CINDOOR T. Function* resaltado en la Figura 11 accedemos al software que nos permite obtener la función de transferencia a partir de los datos obtenidos en una simulación de CINDOOR. La interfaz gráfica de este software es la mostrada en la Figura 13.

Como se aprecia en la Figura 13, la interfaz gráfica que da acceso al cálculo dispone de un botón superior para cargar los datos de la simulación y otro inferior para comenzar el cálculo de la función de transferencia. Una vez cargada la simulación, el programa indicará la frecuencia central de la misma y, a su vez, la frase “Array encontrado” aparecerá para confirmar que la simulación se ha cargado correctamente.

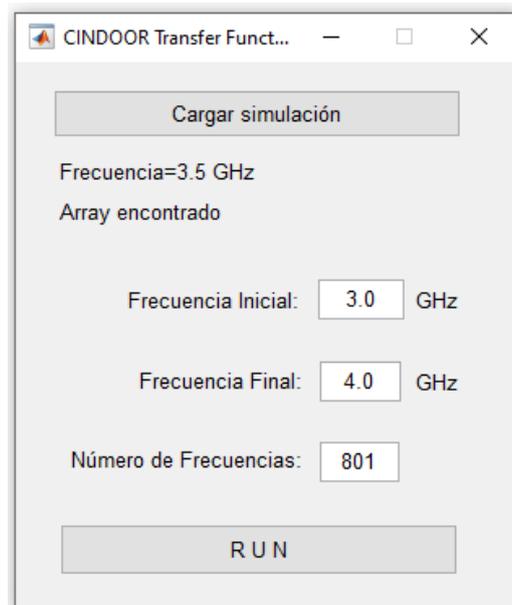


Figura 13. Interfaz gráfica del software dedicado al cálculo de la función de transferencia del canal a partir de una simulación de CINDOOR

Posteriormente, el usuario puede seleccionar el rango de frecuencias de interés, indicando las frecuencias inicial y final, y el número de frecuencias. Una vez seleccionados estos parámetros, desde el botón RUN se ejecuta el programa que procesará la simulación CINDOOR para obtener la función de transferencia. Debido a que este proceso puede llevar unos minutos, se ha incorporado la barra de espera que se muestra en la Figura 14, que permite observar el avance en el procesado de los datos.



Figura 14. Barra de progreso del procesado de datos

Una vez concluida la simulación, nos aparecerá una ventana emergente que nos permitirá salvar la función de transferencia obtenida como un archivo *.mat cuya estructura explicaremos posteriormente.

Para obtener la respuesta al impulso de CINDOOR, mediante el trazado de rayos, podemos considerar una expresión de la forma:

$$h(\tau) = \sum_{i=1}^N a_i \delta(\tau - \tau_i) \quad (17)$$

Donde N es el número de rayos y a_i es el voltaje inducido por cada uno de los rayos. Los rayos no llegan en intervalos regulares de tiempo por lo que no podemos obtener la función de transferencia aplicando la transformada rápida de Fourier (FFT). En su lugar realizamos la transformada analítica:

$$H(f) = \mathcal{F}\{h(\tau)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{i=1}^N a_i \delta(\tau - \tau_i) e^{-j2\pi f\tau} d\tau = \sum_{i=1}^N a_i e^{-j2\pi f\tau_i} \quad (18)$$

De esta forma obtenemos la función de transferencia continua $H(f)$ cuya versión discreta lograremos muestreando a intervalos $R \cdot \Delta f$, siendo R el número de tonos. En este TFM se ha trabajado con $R = 641$ tonos, ya que es el valor usado para las medidas y $\Delta f = 1.25$ MHz.

Una vez muestreada, obtenemos una función de transferencia que ya se podrá comparar con las medidas realizadas, sin que sea necesario preocuparse de las diferencias en las amplitudes relativas de ambas funciones, medida y simulada, ya que posteriormente se realizará una normalización para obtener la capacidad.

Al tratarse de un sistema MIMO masivo se simulará un transmisor y un array de receptores $M \times M$, que en el caso de estudio de este TFM será 10×10 , ya que es el array utilizado en medidas tal y como se resumió en la Tabla 2. Por lo tanto, obtendremos $M \times M$ respuestas impulsivas, en nuestro caso un total de 100.

El código fuente de las rutinas asociadas a los cálculos básicamente aplica (18) para obtener la función de transferencia para cada uno de los receptores del array en todas las frecuencias de la banda de estudio. En este sentido, el pseudocódigo aplicado que representa el procedimiento utilizado sigue la estructura resumida que se muestra en la Figura 15.

```

for Receptor = 1:MxM
    for Frecuencia = Frecuencia Inicial: $\Delta f$ :Frecuencia Final
        H(Receptor, Frecuencia) =  $\sum_{i=1}^N a_i e^{-j2\pi f \tau_i}$ 
    end
end

```

Figura 15. Cálculo de la función de transferencia del canal a partir de una simulación realizada previamente con CINDOOR

Por lo tanto, obtendremos como resultado una matriz de funciones de transferencia de dimensiones ($M \times M$, N° tonos), que en el caso de estudio de este TFM será (100, 641). Como se van a analizar varios transmisores, se ha optado por introducir una dimensión más a la matriz de funciones de transferencia para facilitar posteriormente el análisis conjunto de varios usuarios activos en el escenario, aprovechando así la eficiencia de procesamiento matricial con Matlab. En concreto, la matriz de funciones de transferencia seguirá el formato:

$$H(\text{Receptor}, \text{Transmisor}, \text{Frecuencia})$$

Cuando ejecutemos el software de postprocesado, la matriz de funciones de transferencia, y con ello el archivo *.mat de salida, tendrá dimensiones $100 \times 1 \times 641$.

3.3.2 Capacidad

Una vez descrito el software que permite obtener la función de transferencia del canal a partir de una simulación de CINDOOR, pasamos a describir el software generado para calcular la capacidad del canal. Se han generado dos programas, uno que representa la función de distribución acumulada (CDF) de la capacidad y un segundo dedicado a representar la capacidad en función de la SNR.

En la Figura 16 se muestra la interfaz gráfica que da acceso a los cálculos de la capacidad de canal. Al pulsar en el botón *Capacity* de la Figura 12 accedemos a la citada interfaz gráfica que de la Figura 16. Esta interfaz de usuario será diferente en función de la opción de procesamiento seleccionada por el usuario en la pantalla de acceso de la Figura 12: si se ha seleccionado *CINDOOR simulations* como opción, la interfaz mostrada será la de la Figura 16, mientras que si se ha seleccionado la comparativa de CINDOOR y medidas se mostrará la interfaz de la Figura 17.

Al seleccionar la opción de trabajar con las simulaciones de CINDOOR, la interfaz nos permite cargar la función o funciones de transferencia del canal fruto de las simulaciones originales realizadas con CINDOOR y previamente calculadas con el software ya presentado en la sección 3.3.1 anterior. Para ello y al presionar el botón *Load CINDOOR*, se abrirá una ventana emergente que permitirá al usuario desde el explorador de archivos seleccionar el directorio donde se encuentra cada archivo a cargar.

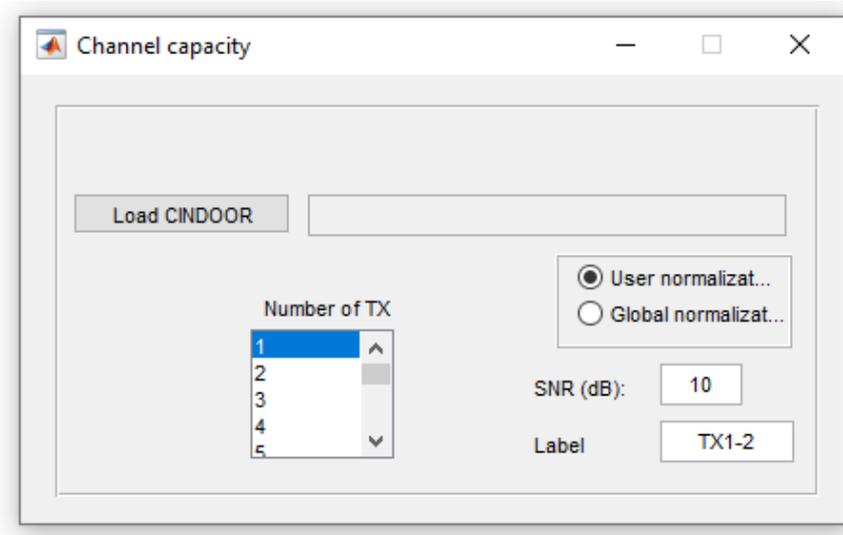


Figura 16. Interfaz gráfica para el cálculo de la capacidad a partir de las simulaciones de canal realizadas con CINDOOR

El cálculo previo de la función de transferencia del canal descrito en la sección 3.3.1 se podría haber integrado bajo esta interfaz dedicada al cálculo de la capacidad de canal. En este sentido, de haber implementado ambos programas de manera conjunta, se permitiría cargar directamente la simulación de CINDOOR en lugar de la función de transferencia ya calculada. Sin embargo, desde el punto de vista computacional esta opción es menos eficiente porque, si se pretenden realizar varias simulaciones probando diferentes transmisores activos así como variando su número, habría que calcular todas las veces la función de transferencia de cada uno de los transmisores. El cálculo de la función de transferencia del canal para cada posición del transmisor puede llevar varios minutos, lo cual ralentizaría mucho el tiempo de procesado para la obtención de la capacidad. Esta es la principal razón por la que se ha optado por separar el procesado de las simulaciones en dos programas independientes de manera que se pueda calcular la función de transferencia de los transmisores deseados y posteriormente, desde esta nueva interfaz, procesar de manera rápida y sencilla tantos transmisores como se desee.

En línea con la interfaz de la Figura 16 desarrollada para integrar los cálculos de la capacidad de canal a partir de las simulaciones, se han introducido mejoras en la interfaz gráfica que se muestra en la Figura 17 para el caso de comparar la capacidad de canal de medidas y simulaciones. En este caso y al igual que con la carga de datos de CINDOOR, se abrirá una ventana emergente donde el usuario podrá seleccionar el directorio donde se encuentran los datos de las medidas a procesar.

Antes de cargar las medidas se debe seleccionar el número de transmisores para que, de este modo, el programa permita al usuario cargar tantas funciones de transferencia como transmisores se hayan seleccionado.

Una vez se han cargado los ficheros con datos de CINDOOR en la primera de las interfaces (Figura 16) o los de CINDOOR y las simulaciones en la segunda (Figura 17), nos aparecerán las opciones resaltadas en rojo en la Figura 18. Estas opciones nos

permiten escoger entre la representación de la función de distribución acumulada de la capacidad (*CDF*) o la representación de la capacidad en función de la SNR (*SNR sweep*).

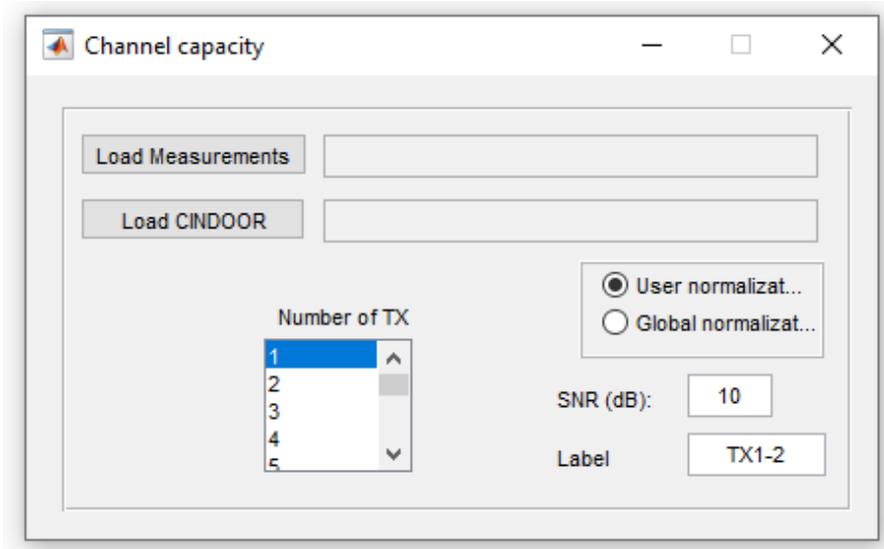


Figura 17. Interfaz gráfica para comparar las capacidades de canal obtenidas en medidas y simulaciones

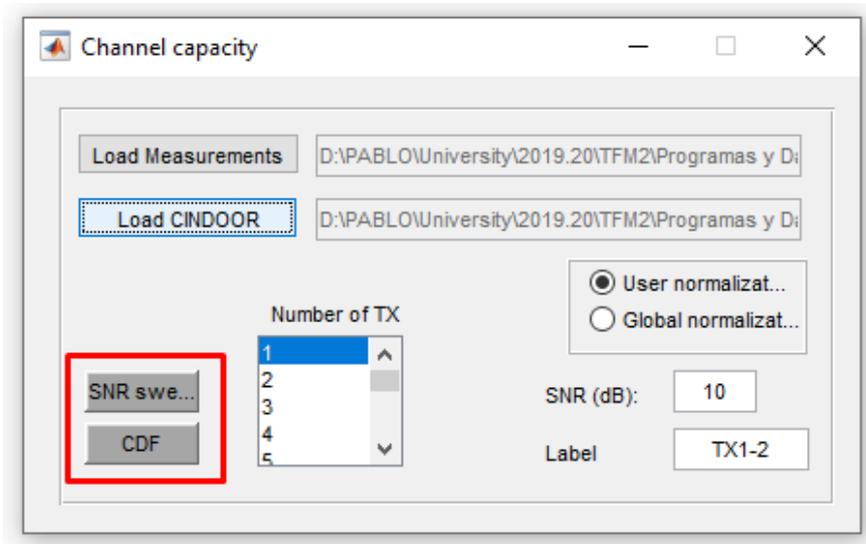


Figura 18. Interfaz gráfica que da acceso al cálculo de la capacidad de canal

Antes de seleccionar el tipo de análisis deseado se debe seleccionar el tipo de normalización, así como la SNR que se desea emplear en los cálculos. Además, el programa permite incorporar una etiqueta que será utilizada para rotular la figura generada con los resultados de salida.

Una vez seleccionada la opción deseada para la representar la capacidad, el programa se ejecutará utilizando los parámetros escogidos y los archivos seleccionados, y el resultado

será una gráfica que aparecerá por pantalla. En el caso de haber escogido la representación de la CDF de la capacidad, obtendríamos una gráfica similar a la que se muestra como ejemplo para el caso particular de dos transmisores en la Figura 19. En este caso concreto, se ha elegido como ejemplo una comparativa entre los resultados obtenidos con CINDOOR y las medidas de canal asociadas.

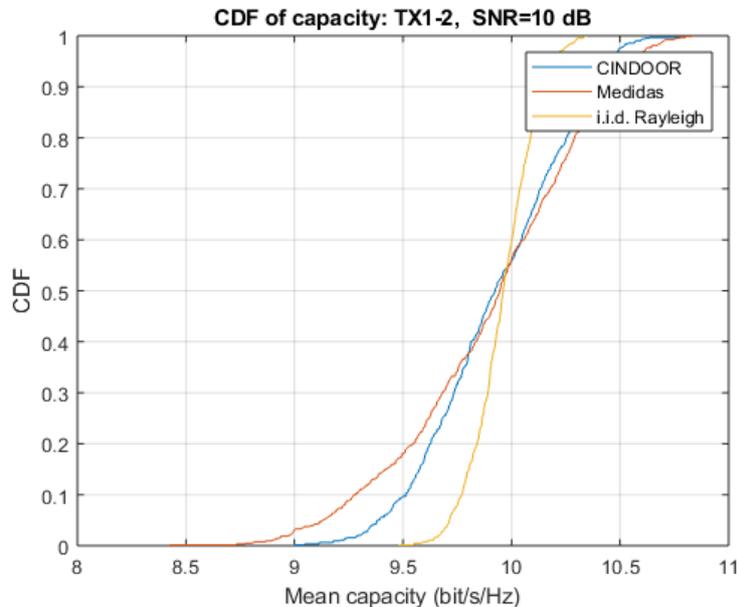


Figura 19. CFD de la capacidad, comparativa entre CINDOOR y medidas

Como se aprecia en la Figura 19, se representan 3 CDF diferentes, en azul la CDF de la capacidad de canal asociada con las simulaciones realizadas en CINDOOR, en rojo la propia correspondiente a las medidas y en amarillo la de un canal que sigue una distribución de tipo Rayleigh.

Si seleccionamos la representación de la capacidad en función de la SNR, lo que internamente el programa es un cálculo de la capacidad de canal haciendo un barrido para distintos valores de SNR, y obtendríamos una gráfica similar a la de la Figura 20, de nuevo considerando como ejemplo el caso particular de dos transmisores o usuarios activos. Al igual que en el ejemplo anterior, se representa la capacidad de CINDOOR, medidas y la de un canal tipo Rayleigh para establecer la comparativa.

Como se puede observar, en el título de las gráficas se añade la etiqueta propuesta por el usuario antes de ejecutar el programa, en este caso “TX1-2”.

Como complemento a la descripción de las interfaces gráficas, el resto de la sección se va a dedicar a presentar las bases del motor de cálculo que se ha traducido posteriormente a código fuente para obtener y presentar los resultados de capacidad de canal (CDF o barrido en función de la SNR). En concreto, el código utilizado para la obtención de la CDF de la capacidad se incluye en el Anexo 1 del documento y el de la capacidad en función de la SNR en el Anexo 2.

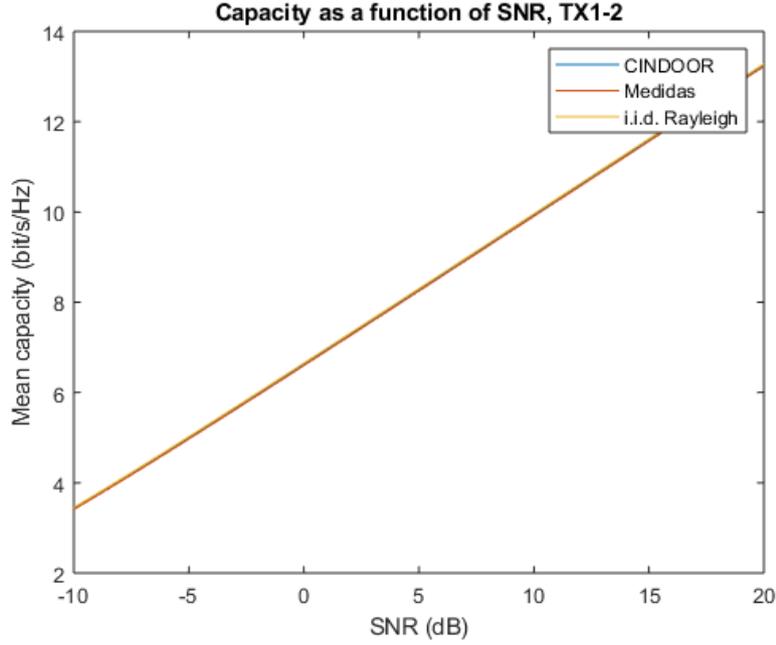


Figura 20. Representación de la capacidad en función de la SNR, comparativa entre CINDOOR y medidas

Desde el punto de vista de la programación, el primer paso consiste en cargar las funciones de transferencia de cada uno de los transmisores, que se incorporarán a una matriz de tres dimensiones. Previamente y como ya se explicó en la sección 3.3.1, se ha generado la función de transferencia como una matriz de tres dimensiones que sigue la estructura $H(\text{Receptor}, \text{Transmisor}, \text{Frecuencia})$.

Esta estructura es idéntica a la ya empleada como salida del software desarrollado para la obtención de la función de transferencia a partir de las simulaciones de CINDOOR pero, en esta ocasión, el número de transmisores dependerá del valor seleccionado por el usuario, con lo que la segunda dimensión no siempre será 1.

Una vez cargadas las funciones de transferencia, se aplicará la normalización, según la elección del usuario. En este caso, se contemplan dos normalizaciones, las llamadas normalización de usuario o la normalización global, en adelante denotadas como N1 y N2, respectivamente.

Estas normalizaciones coinciden con las ya descritas en el capítulo 2 de este TFM (10)-(11) y que se reproducen en (19)-(20). La función de transferencia G será multiplicada por una matriz diagonal J cuyos elementos de la diagonal vendrán definidos por una de las dos expresiones que se presentan en (19)-(20). En concreto, para la normalización de usuario N1 se considera:

$$j_q = \sqrt{\frac{M}{\frac{1}{N_f} \sum_{k=1}^{N_f} |g'_q[k]|^2}}; \quad q = 1, \dots, K \quad (19)$$

Para cada usuario, la normalización será diferente, por ello se ha definido esta normalización como normalización de usuario. Por el contrario, para la normalización global o N2 todos los elementos de la matriz diagonal J tendrán el mismo valor:

$$j_q = \sqrt{\frac{MK}{\frac{1}{N_f} \sum_{k=1}^{N_f} |G'[k]|_F^2}}; \quad q = 1, \dots, K \quad (20)$$

Una vez calculada la función de transferencia normalizada se realizará el cálculo de la capacidad de acuerdo con (21). En el caso de la representación de la CDF, para la SNR elegida por el usuario y para el caso de la capacidad en función de la SNR, para un rango fijado, el extracto principal de los códigos fuente asociados se muestran en las Figuras 21-22, respectivamente.

$$C(i) = \sum_{k=1}^K \log_2 \left(1 + \frac{\rho}{K} \cdot \lambda_k \right), \quad i = 1, 2, \dots, N_f \quad (21)$$

```
%Cálculo de los autovalores
D = (svd(H)).^2;
D1(f,:) = D.';

%Capacidad
C(f) = sum(log2(1+snr/(Nt)*D1(f,:)));
```

Figura 21. Cálculo de la capacidad para la representación de la CDF

```
%Cálculo de los autovalores
D = (svd(H)).^2;
D1(f,:) = D.';

%Rango de valores de la SNR: fijado por el usuario
SNR=linspace(-10,20,64);
snr=10.^(SNR/10);

%Cálculo de capacidad
for n=1:size(SNR,2)
    for f=1:Nf
        C(n,f) = sum(log2(1+snr(n)/Nt*abs(D1(f,:))));
    end
end
```

Figura 22. Cálculo de la capacidad para cada valor de SNR

Una vez se han descrito de forma pormenorizada en este capítulo las contribuciones de este TFM a la herramienta de post-procesado y análisis de canal, el siguiente capítulo se dedica a analizar los resultados que se obtienen con CINDOOR en dos escenarios concretos. En el primero de los escenarios contamos con una campaña de medidas, de forma que se utilizará éste como un escenario canónico de referencia en el que analizar

el potencial y la utilidad de los resultados obtenidos con la herramienta de simulación CINDOOR. En el segundo de los escenarios, más complejo y donde por sus dimensiones y disposición de usuarios y antenas resultaría muy complejo realizar una campaña de medidas, el análisis del canal radio se limitará a los resultados obtenidos en las simulaciones.

Capítulo 4. Resultados

Este cuarto capítulo va a profundizar en el análisis de los resultados obtenidos con el software desarrollado en este TFM, descrito en el capítulo anterior. Se analizarán los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas con CINDOOR en dos escenarios propuestos. El primero de los escenarios servirá de referencia para comprobar la fiabilidad de la herramienta, ya que se dispone de los resultados de una campaña de medidas realizada por el grupo GISAR con el sistema de medida expuesto en la sección 3.2.

Posteriormente, una vez quede demostrado el potencial de CINDOOR para el análisis de estos entornos, se analizará un escenario donde la realización de una campaña de medidas resultaría muy costosa, debido a la complejidad y tamaño de este segundo escenario. Por lo tanto, se analizarán únicamente los resultados obtenidos mediante las simulaciones realizadas con CINDOOR sobre este escenario.

Este capítulo estará dividido en 3 secciones, dedicando las dos primeras al análisis de los resultados en cada uno de los escenarios propuestos y una tercera sección a modo de conclusión.

4.1 Escenario de Referencia. Sala Multiusos

El primero de los entornos de análisis es la sala multiusos, ubicada en el edificio de I+D+i de Ingeniería de Telecomunicación Profesor José Luis García García. La sala, que puede apreciarse en la Figura 23, está equipada con 6 filas de mesas y sillas y dos armarios, se encuentra situada en un edificio moderno construido en hormigón armado, las paredes están compuestas por una serie de paneles de yeso y todos los recintos cuentan con puertas metálicas [5]. La sala tiene 14.5 m de largo por 8.8 m de ancho, y una altura de 2.98 m. En lo que respecta a los materiales de construcción y en lo que afecta en particular a este recinto del edificio, hay que resaltar que, aunque las particiones interiores y que delimitan la sala son de placas de fibroyeso, tras el recubrimiento de la pared del fondo hay un muro de piedra y hormigón. Además, en este sentido también debe hacerse constar que la puerta metálica que da acceso al interior de la sala está más centrada con el pasillo.

Se escogió esta ubicación como problema canónico para analizar el potencial de la herramienta de simulación ya que en 2019 había sido el escenario de una campaña de medidas realizadas por el grupo GISAR en la banda de interés de 3.5 GHz. La geometría y simetría del entorno hacen de éste un escenario interesante en el que contrastar los resultados de las medidas con las simulaciones realizadas en CINDOOR.



Figura 23. Vista frontal de la Sala Multiusos.

4.1.1 Entorno y Configuración

En lo que respecta a la campaña de medidas y centrando el estudio en el enlace ascendente, en el entorno presentado en la Figura 23 se consideraron 10 emplazamientos diferentes para el transmisor, tal y como se recoge en detalle en la Figura 24. Para la realización de estas medidas se había optado por una altura que simulase la de un terminal de un usuario a pie, situándose los transmisores a 1.48 metros sobre el suelo en cada uno de los puntos seleccionados. Los 10 emplazamientos seleccionados en este TFM como punto de partida quedan recogidos en la Tabla 3 y se corresponden con una situación de línea de visión directa (LOS) entre el transmisor y el array virtual receptor que hace las veces de estación base y que estaba colocado al fondo de la sala. No obstante, la campaña de medidas original contemplaba situaciones de medida NLOS, con otros 3 puntos de medida situados fuera de la sala, pero que se han descartado para la realización de este TFM.

Como se indica en el párrafo anterior, el array receptor se situó al fondo de la sala, quedando su centro a 2 m de altura y siendo sus coordenadas (4.4 , 13.83) m sobre los ejes x, y, de acuerdo con el sistema de coordenadas que se muestra en la Figura 24. Para cada una de las 10 posiciones del Tx se realizó un barrido de 10×10 puntos, con una separación uniforme entre los elementos del array virtual de 50 mm en ambas direcciones.

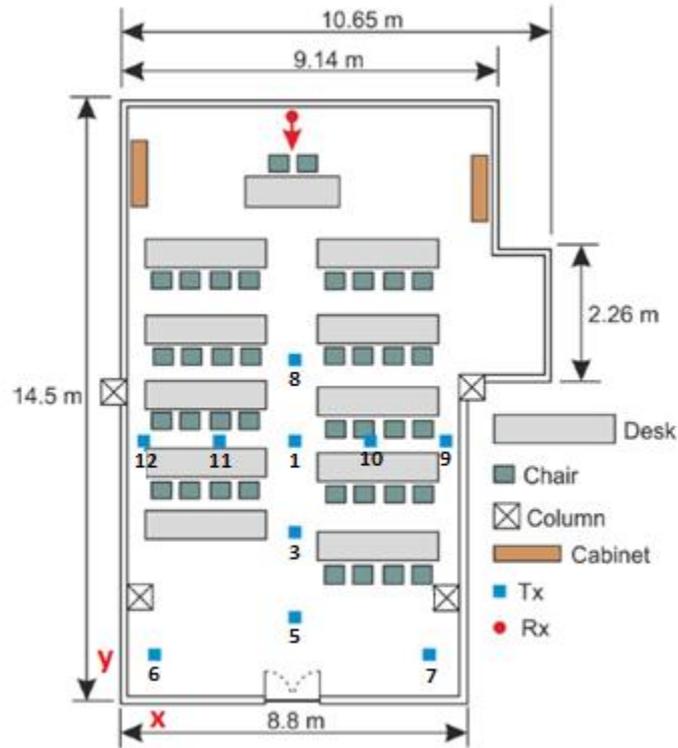


Figura 24. Vista superior de la sala multiusos con detalle de los puntos de medida.

Tabla 3. Coordenadas de los puntos de medida.

Transmisor	x (metros)	y (metros)
1	4.40	6
3	4.40	4
5	4.40	2
6	1.45	1.12
7	7.46	1.03
8	4.45	8.07
9	8.40	6
10	6.46	6
11	2.40	6
12	0.40	6

Para la realización de las simulaciones en CINDOOR se desarrolló el modelo expuesto en la Figura 25. Como puede observarse, el interior de la sala multiusos se modeló con gran detalle, apreciándose cada una de las mesas, así como las columnas. Por otra parte, se implementaron a grandes rasgos las estancias contiguas para tener en cuenta posibles contribuciones relevantes de mayor orden del multicamino, ya que los detalles de éstas tendrán una menor contribución en el resultado final. El modelo electromagnético generado cuenta con 94 placas, cuyas propiedades electromagnéticas fueron escogidas según [18], y teniendo en cuenta los materiales que componen la planta del edificio.

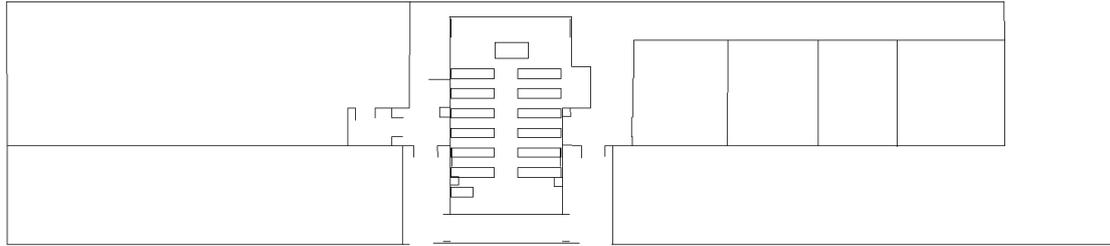


Figura 25. Modelo de la Sala Multiusos utilizado para realizar las simulaciones en CINDOOR.

Sobre este modelo se posicionaron los 10 puntos de análisis en las mismas posiciones que los utilizados para la campaña de medidas, de tal forma que se pudiesen comparar los resultados de forma precisa. El array receptor, que simula la estación base, está compuesto por un mallado de 10×10 puntos equiespaciados uniformemente en ambas direcciones $\lambda/2$ a la frecuencia de 3 GHz, misma separación que la utilizada en la campaña de medidas (50 mm). Las antenas utilizadas para las simulaciones se dispusieron en una posición y polarización similar a las de las medidas. Tratando de aproximarse lo máximo posible al patrón de radiación y ganancia de las antenas utilizadas en la medida, se optó por la antena dipolo elemental para los transmisores y la antena directiva Hyperlink para cada uno de los receptores del array.

Para cada uno de los puntos del array receptor se analizó la contribución de los rayos directo, los reflejados hasta la séptima reflexión, los difractados y doblemente difractados, los difractados-reflejado y reflejados-difractado. Se realizaron simulaciones teniendo en cuenta diferentes números de reflexiones, que serán analizadas en las secciones subsiguientes. Para el trazado de rayos hasta la cuarta reflexión y los efectos de la difracción se optó por el modelo presentado en la Figura 25, y cuyo resultado tras el trazado de rayos puede apreciarse en la Figura 26.

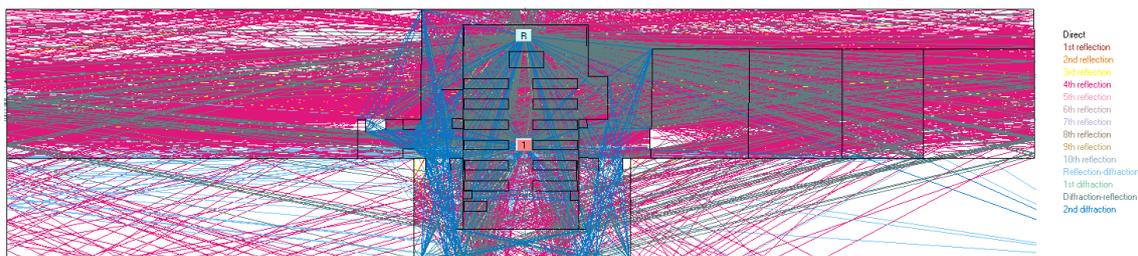


Figura 26. Trazado de rayos en CINDOOR hasta la cuarta reflexión, primera y segunda difracción, reflexión-difracción y difracción-reflexión.

Para la simulación de la quinta, sexta y séptima reflexión se optó por un modelo simplificado, ya que el número de rayos aumenta de manera considerable prolongando a su vez el tiempo de simulación. En la Figura 27 se puede apreciar el modelo empleado y el trazado de rayos para estos tres órdenes de reflexión.

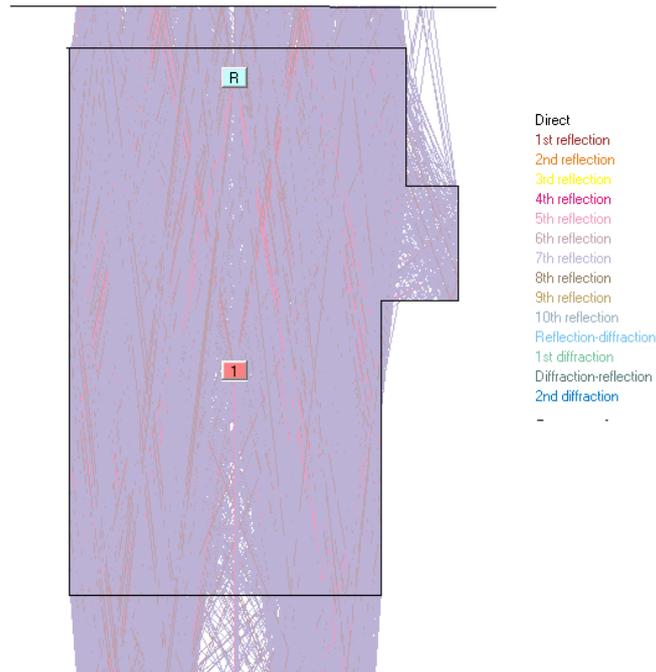


Figura 27. Trazado de rayos en CINDOOR para la cuarta, quinta y sexta reflexión.

A continuación, se presentarán y analizarán los resultados obtenidos en el entorno propuesto y para la configuración detallada previamente. En primer lugar, se analizará la CDF de la capacidad para posteriormente centrarnos en la representación de la evolución de la capacidad en función de la SNR.

4.1.2 CDF de la Capacidad

Una vez expuesto el entorno de estudio y la configuración escogida, en esta sección se presentarán los resultados obtenidos a partir de las simulaciones de CINDOOR. En concreto, se analizará la función de distribución acumulada de la capacidad para diferentes números de transmisores activos. Como en este primer entorno se cuenta con medidas de referencia, se compararán los resultados obtenidos mediante las simulaciones de CINDOOR con los obtenidos en la campaña de medidas, que servirán como referencia para demostrar la fiabilidad de CINDOOR.

Para todas las representaciones mostradas a lo largo de la sección, se ha considerado una relación señal a ruido igual a 10 dB, y a su vez se ha optado por la normalización de usuario explicada en capítulos previos.

Se realizaron las simulaciones en CINDOOR para cada uno de los transmisores teniendo en cuenta hasta la 4ª y hasta la 7ª reflexión, para comparar los resultados obtenidos dependiendo del número de reflexiones seleccionado. Posteriormente, se representaron las CDF para las simulaciones realizadas comparando los resultados obtenidos según el número de reflexiones empleado. Como ejemplo representativo, la comparativa entre los resultados obtenidos con 4ª y 7ª reflexión para el transmisor 9 se muestra en la Figura 28.

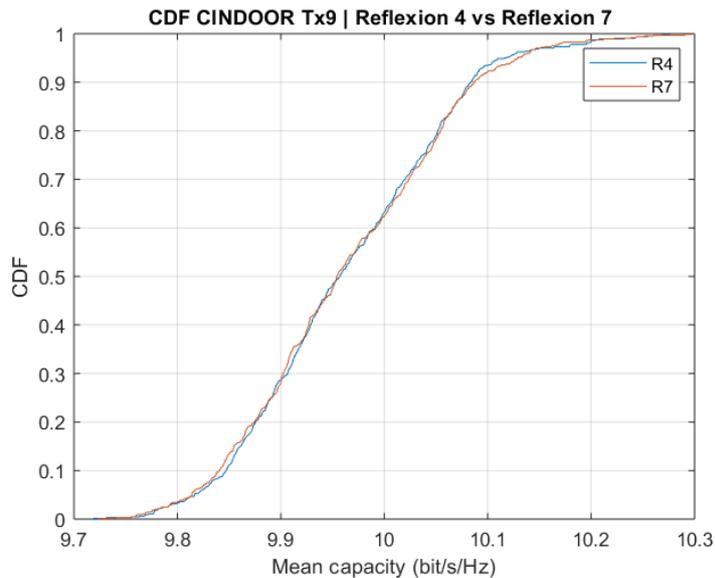


Figura 28. CDF de la capacidad de las simulaciones de CINDOOR para el transmisor 9. Comparativa entre R4 y R7.

La diferencia obtenida entre la simulación realizada hasta la 4ª reflexión (R4) y hasta la 7ª (R7) es mínima. Un resultado similar se obtuvo para el resto de transmisores, como puede observarse en la Figura 29 con un nuevo ejemplo, en este caso para el Tx 3.

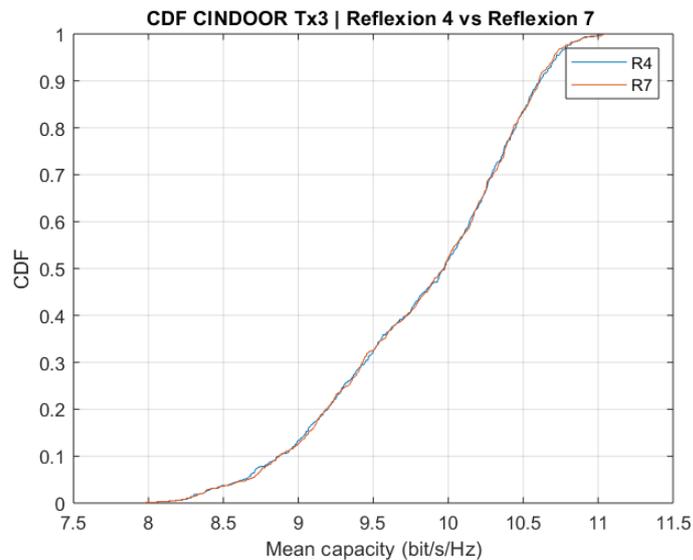


Figura 29. CDF de la capacidad de las simulaciones de CINDOOR para el transmisor 3. Comparativa entre R4 y R7.

De estos resultados podemos concluir que la aportación de la quinta reflexión en adelante en el resultado final es prácticamente despreciable, apenas observándose diferencia en los resultados representados entre R4 y R7.

Con el objetivo de demostrar que la aportación a partir de la cuarta reflexión era mínima se realizaron comparativas para diferentes números de usuarios activos, continuando la tendencia expuesta para un único usuario, observándose mínimas diferencias entre ambas

simulaciones. En la Figura 30 puede apreciarse la diferencia entre R4 y R7 cuando los 10 transmisores se encuentran activos simultáneamente en la sala multiusuarios.

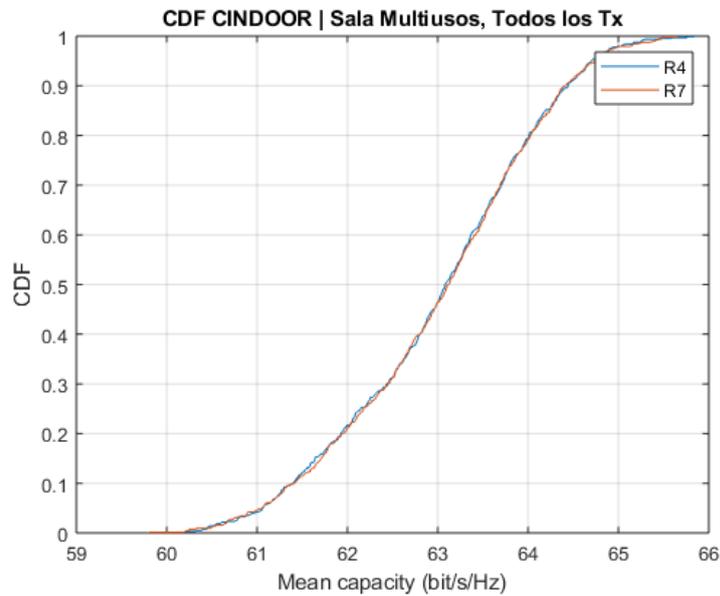


Figura 30. CDF de la capacidad de las simulaciones de CINDOOR para los 10 transmisores activos. Comparativa entre R4 y R7.

Los resultados expuestos de ahora en adelante se procesaron utilizando las simulaciones realizadas teniendo en cuenta hasta la séptima reflexión.

Una vez escogidas las simulaciones hasta la 7ª reflexión, se procede a su análisis, en primera instancia para cada uno de los 10 transmisores activos. En la Figura 31 se recogen las CDF obtenidas para cada uno de los 10 transmisores y superpuestas todas ellas en una misma gráfica.

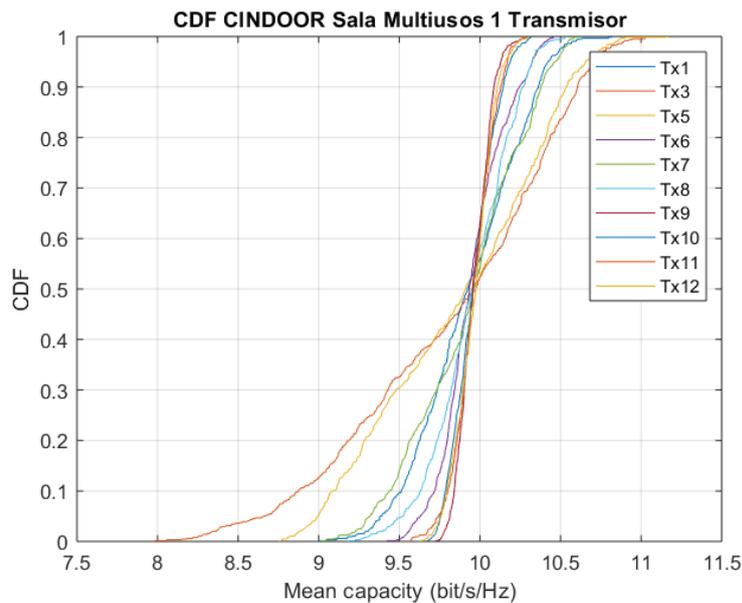


Figura 31. CDF de la capacidad de las simulaciones de CINDOOR para cada uno de los 10 transmisores.

E los resultados expuestos en la Figura 31 se aprecia cómo dependiendo del lugar de la sala donde se encuentre situado el transmisor, la capacidad puede variar hasta en 1.5 bit/s/Hz en los extremos de la CDF, siendo todas ellas muy similares en torno al valor mediano. Posteriormente analizaremos más en detalle cada uno de los transmisores, comparándolos con las medidas, cuyas CDF de capacidad se pueden apreciar en la Figura 32.

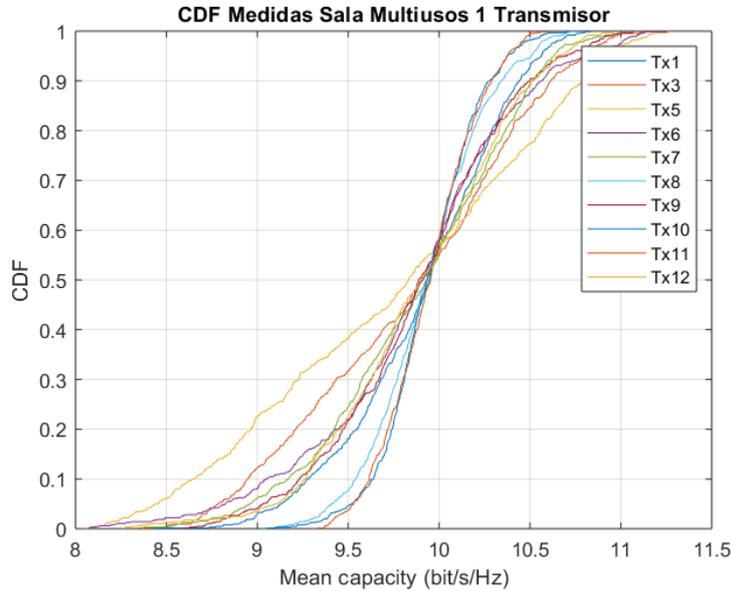


Figura 32. CDF de la capacidad de las medidas para cada uno de los 10 transmisores.

A continuación, el análisis se centrará en ciertos transmisores, comparando el resultado simulado con el medido, para encontrar cuales de las simulaciones ofrecieron resultados más precisos, teniendo en cuenta el posicionamiento en la sala de cada uno de los transmisores. En las comparaciones se incluye un canal tipo Rayleigh que servirá como una referencia adicional para el análisis de los resultados.

Comenzaremos analizando los puntos cuya simulación ofreció un resultado más similar al obtenido con las medidas, siendo éstos los transmisores 1, 3, 7, 8, 10 y 11. En la Figura 33 puede observarse el resultado obtenido para el transmisor 7, comparando los resultados de medidas, simulaciones y los obtenidos para un canal tipo Rayleigh. Las tres gráficas se cortan aproximadamente en torno al punto mediano, donde la capacidad es de 10 bit/s/Hz. Centrándonos en la comparativa entre la simulación de CINDOOR y la medida, el resultado obtenido es muy similar, apreciándose una diferencia máxima en torno a 0.5 bit/s/Hz en los extremos. Las gráficas tienen formas similares siendo la pendiente ligeramente diferente.

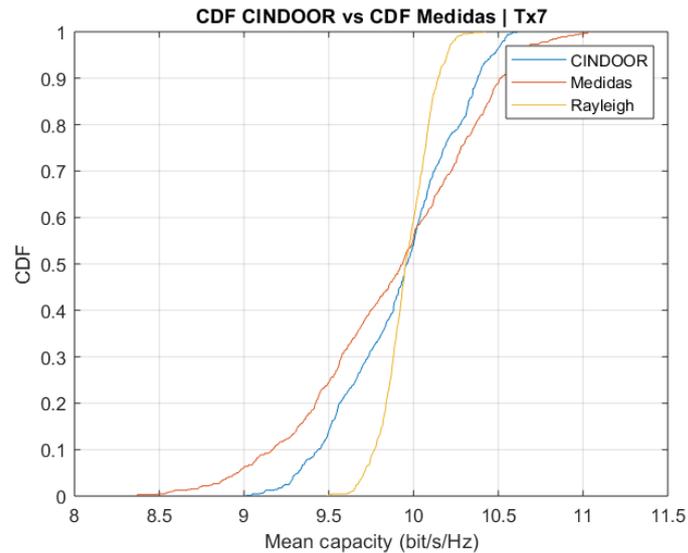


Figura 33. Comparativa de la CDF de la capacidad para el transmisor 7.

Un resultado similar se obtuvo para el transmisor 1, representado en la Figura 34, donde se observa de nuevo que la diferencia de capacidad en las colas de la CDF es inferior a los 0.5 bit/s/Hz observados para el transmisor 7 y, al igual que sucedía previamente, las tres representaciones presentan un valor mediano de la capacidad similar.

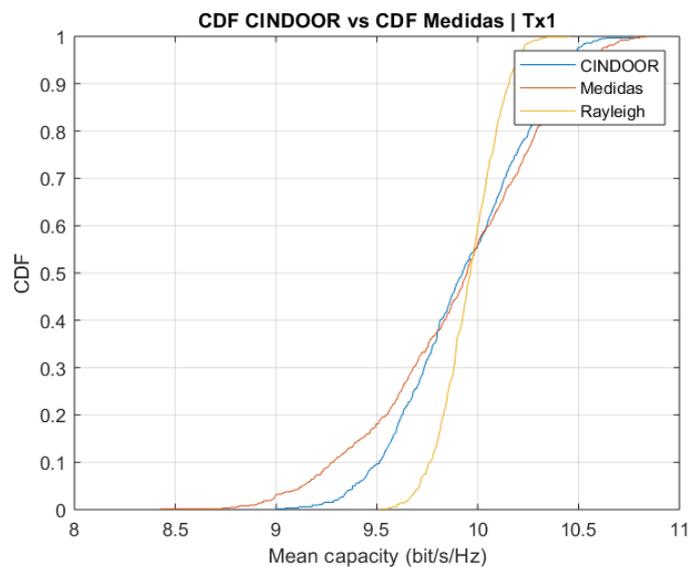


Figura 34. Comparativa de la CDF de la capacidad para el transmisor 1.

Las gráficas obtenidas para el transmisor 3 y 8 no difieren apenas de las presentadas para el 1 y el 7, las diferencias en los extremos rondan los 0.5 bit/s/Hz. Para los transmisores 10 y 11 las diferencias entre simulaciones y medidas fueron incluso menores como se aprecia en la Figuras 35 y 36, donde para el transmisor 11 la diferencia es inferior a 0.2 bit/s/Hz en el peor caso.

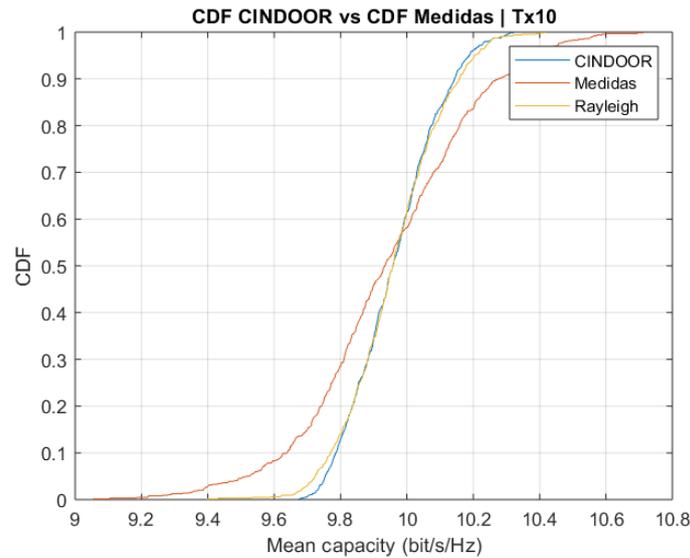


Figura 35. Comparativa de la CDF de la capacidad para el transmisor 10.

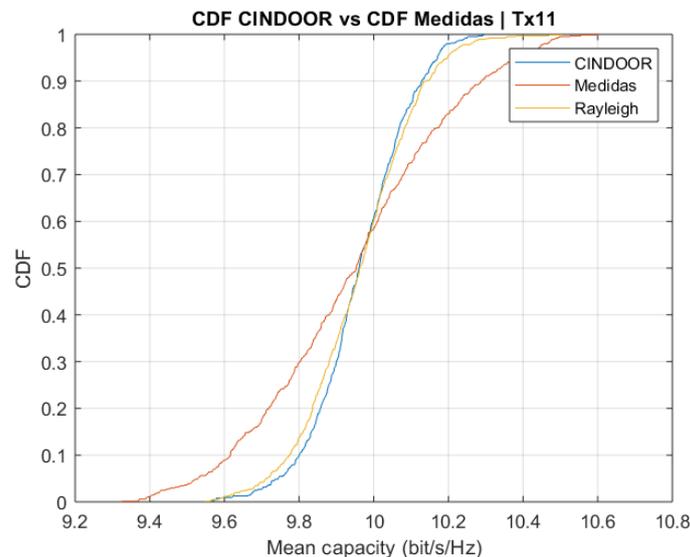


Figura 36. Comparativa de la CDF de la capacidad para el transmisor 11.

Los resultados de las simulaciones de los transmisores 10 y 11 muestran como la CDF es muy similar a la obtenida para el canal Rayleigh, lo cual no sucedía para los analizados previamente.

Observando la posición de los transmisores cuya simulación muestra un comportamiento similar al medido, se aprecia que el 1, 3, 8, 10 y 11 están enfrente del array receptor, alejados de las paredes, en el centro de la sala; y esa simetría, unido a la interacción con la puerta metálica y el muro de hormigón del fondo, hace que existan unas componentes dominantes y claras del multicamino.

Los transmisores para los que peores resultados se obtuvieron en la comparativa entre medidas y simulaciones fueron el 9 y el 12, ambos situados junto a la pared en el centro de la sala y el 6, situado en una de las esquinas traseras. Como ejemplo, se incluyen los resultados en las Figuras 37 y 38 para los dos transmisores comentados, donde se aprecia

cómo la diferencia en los extremos de las CFDs puede llegar a 1 bit/s/Hz. Las simulaciones de CINDOOR siguen una forma muy similar a la del canal Rayleigh, como ya sucedía con las simulaciones en el centro de la sala pero, en este caso, las medidas difieren notablemente del resultado obtenido en las simulaciones.

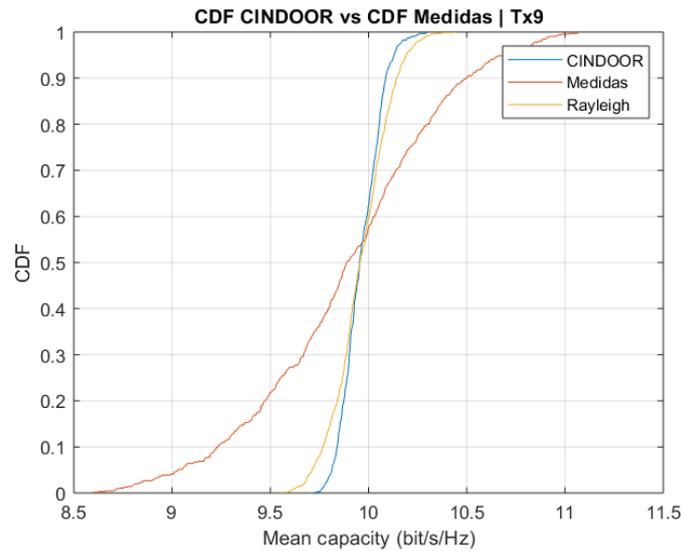


Figura 37. Comparativa de la CDF de la capacidad para el transmisor 9.

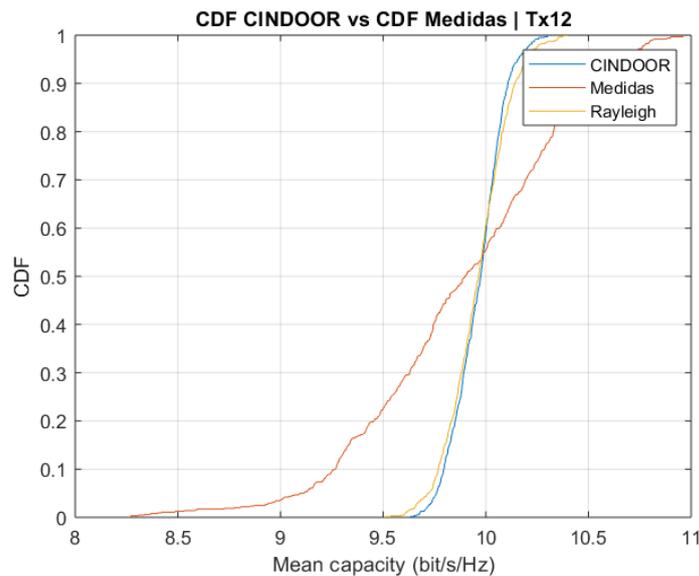


Figura 38. Comparativa de la CDF de la capacidad para el transmisor 12.

En un punto intermedio se encuentra la comparativa asociada con los resultados obtenidos para el transmisor 5, expuestos de forma gráfica en la Figura 39, y donde pese a diferir bastante los resultados de capacidad extraídos de la medida y el canal tipo Rayleigh, CINDOOR es capaz de aproximarse mucho a los resultados experimentales, siendo la diferencia en las colas de la CDF inferior a 1 bit/s/Hz.

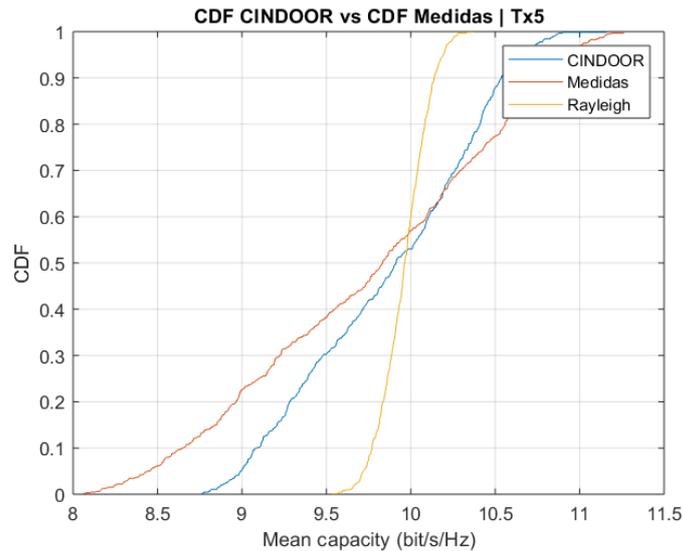


Figura 39. Comparativa de la CDF de la capacidad para el transmisor 5.

En la Tabla 4 se recoge un resumen del resultado obtenido para cada transmisor, donde se indica la similitud entre medidas y simulaciones para cada uno de ellos, aplicándole un código de color según la diferencia obtenida.

Tabla 4. Comparativa entre simulaciones y medidas para cada transmisor

Transmisor	Diferencia Máxima entre Simulación y Medidas (bit/s/Hz)
1	0.5
3	0.5
5	0.75
6	1.5
7	0.5
8	0.2
9	1
10	0.4
11	0.2
12	1.5

Los puntos donde menor diferencia se recoge entre simulación y medidas se encuentran situados en el centro de la estancia. Por el contrario, los transmisores que se encontraban junto a la pared presentaron una mayor diferencia entre medidas y simulación. Se presenta la Figura 40 como ayuda visual para el análisis del resultado según el posicionamiento dentro de la estancia, asignando el código de color anterior a los puntos sobre el modelo.

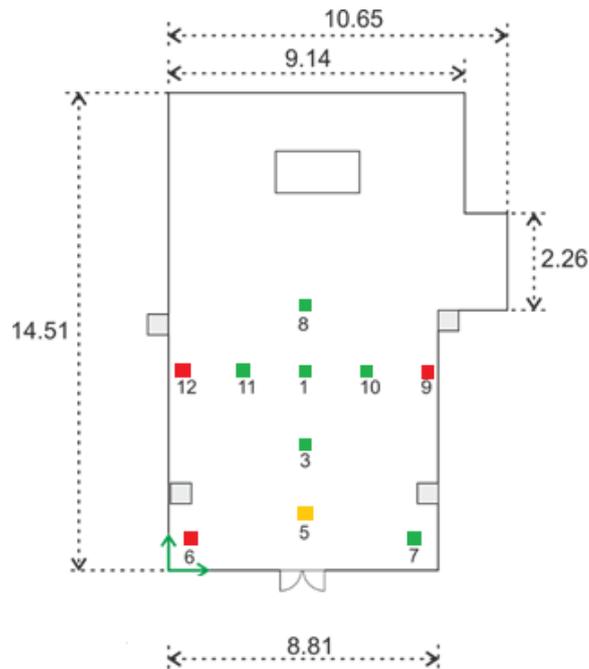


Figura 40. Vista en planta del entorno de interés, con detalle de los transmisores coloreados según la similitud obtenida entre medidas y simulaciones.

Una vez analizadas las capacidades obtenidas para un único transmisor activo, el siguiente paso es observar el comportamiento para varios transmisores activos simultáneamente. Comenzaremos el estudio observando el comportamiento para 2 transmisores e iremos incrementando progresivamente el número de transmisores hasta obtener el resultado para los 10 transmisores activos.

Para dos usuarios activos las diferentes combinaciones de transmisores nos proporcionan resultados muy diversos, y se procede en los siguientes párrafos a analizar algunos de estos resultados, en concreto aquellos que sirvan como ejemplo debido a su singularidad o a que sean representativos dentro de las combinaciones de transmisores con resultados similares. En general, las diferencias observadas entre las medidas y las simulaciones han sido mínimas, como podemos apreciar en la Figura 41, para un caso de ejemplo representativo en el que se consideran como activos los transmisores 1 y 6. Para el caso del transmisor 6 trabajando en solitario se encontró una de las mayores diferencias entre el resultado obtenido con las simulaciones y el medido, pero al incorporar en el análisis un segundo transmisor, se aprecia como la diferencia es menor, en torno a 1 bit/s/Hz en la peor situación.

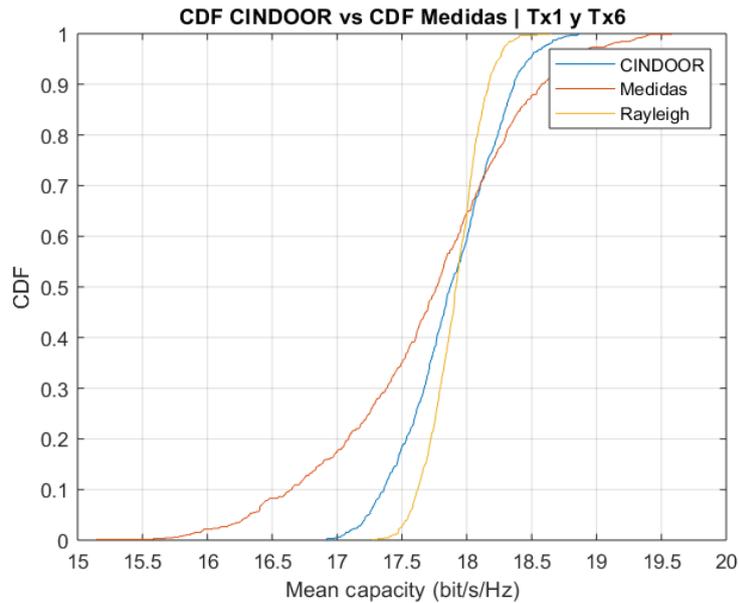


Figura 41. CDF de la capacidad para los transmisores 1 y 6.

Otro aspecto interesante a analizar es qué ocurre cuando los 2 transmisores activos seleccionados para realizar el análisis ya dieron buenos resultados por separado, al hacer la comparativa entre medidas y simulaciones. Estos casos de estudio pueden observarse en las Figuras 42 y 43, considerando las parejas de transmisores Tx 10-11 y Tx 3-7, respectivamente. Como puede observarse en ambas figuras, el resultado obtenido es muy bueno, siendo mínima la diferencia entre simulaciones y medidas; esto viene reforzado por lo prometedor que eran ya los resultados obtenidos en las simulaciones al analizar estos transmisores individualmente.

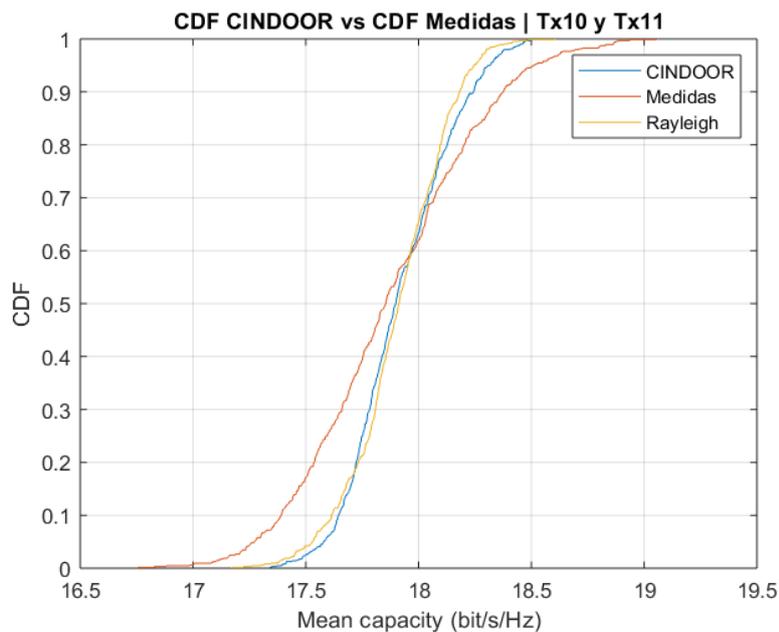


Figura 42. CDF de la capacidad para los transmisores 10 y 11.

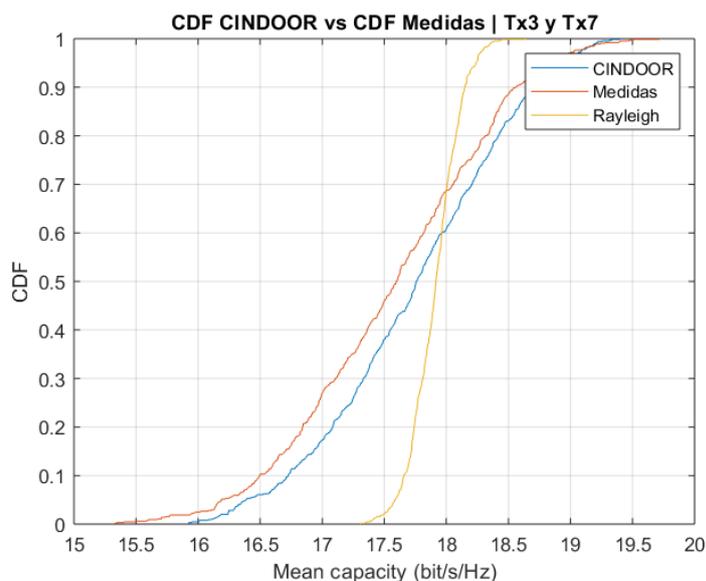


Figura 43. CDF de la capacidad para los transmisores 3 y 7.

En los resultados de la Figura 43, donde los transmisores 3 y 7 están activos, se aprecia cómo ambas curvas son paralelas con una forma similar y las capacidades obtenidas apenas se diferencian en 0.5 bit/s/Hz. La tendencia a obtener curvas paralelas entre los resultados de simulaciones y medidas se irá acentuando a medida que añadamos más transmisores activos.

En cuanto a los valores de capacidad obtenidos, observando los resultados presentados anteriormente, podemos concluir que estando activos los transmisores situados en el centro de la sala más cerca del receptor (Figura 42) la capacidad obtenida es ligeramente superior que cuando se incluye uno de los transmisores situados en el fondo de la estancia (Figuras 41 y 43), pero la diferencia sigue siendo muy pequeña en valor mediano. Esta tendencia puede comprobarse observando la Figura 44, donde los transmisores 1 y 10 empleados se encuentran centrados en la sala.

Posteriormente se continuó el estudio aumentando el número de transmisores activos, pasando de 2 a 4 transmisores. Para el caso de 4 transmisores activos simultáneamente se observa cómo, independientemente de los transmisores elegidos, las curvas de simulaciones y medidas dejan de cruzarse. Otro aspecto que se aprecia al analizar esta nueva serie de resultados, es que independientemente de los transmisores seleccionados los resultados son muy similares en cuanto a la forma de las curvas obtenidas. Sirvan las Figuras 45 y 46 como ejemplos representativos de los resultados que se obtienen para 4 transmisores activos.

Analizando estos resultados, puede observarse cómo las gráficas de las simulaciones realizadas con CINDOOR y las medidas tienden a una misma capacidad máxima, mientras que la mayor diferencia se aprecia en la capacidad mínima. En cuanto a los valores obtenidos, éstos pueden diferir en 1 o 2 bit/s/Hz dependiendo de los transmisores escogidos, pero todas las capacidades rondan los 31 bit/s/Hz para el valor mediano, algo inferior al canal Rayleigh de referencia.

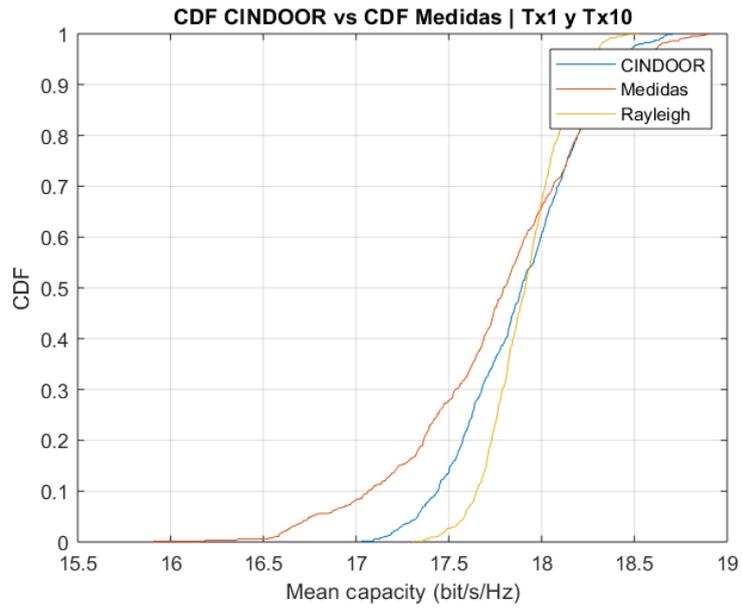


Figura 44. CDF de la capacidad para los transmisores 1 y 10.

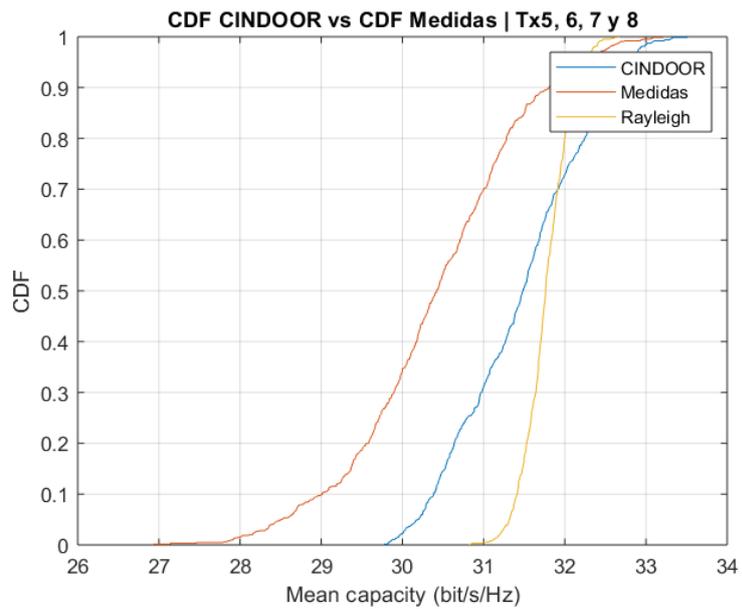


Figura 45. CDF de la capacidad para los transmisores 5, 6, 7 y 8

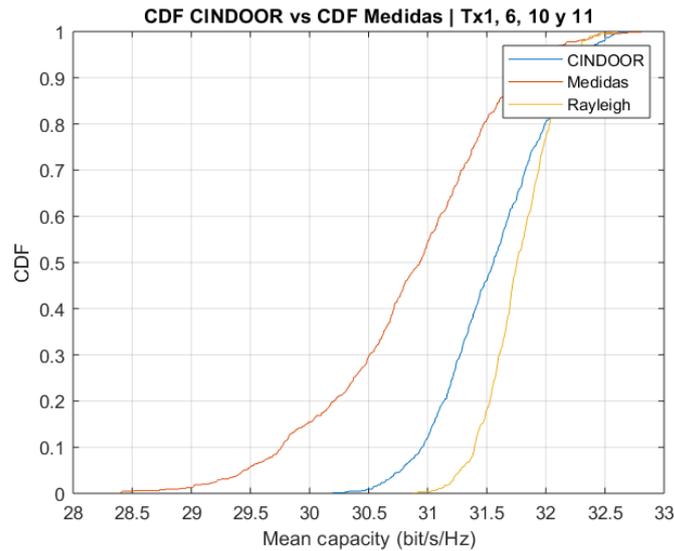


Figura 46. CDF de la capacidad para los transmisores 1, 6, 10 y 11

Se procede a continuación a seguir aumentando el número de transmisores activos, pasando de 4 a 6 y, conforme se incrementa el número de transmisores que están activos de forma simultánea, las curvas tienden a ser cada vez más paralelas, algo que se aprecia de forma clara en las Figuras 47 y 48 para dos conjuntos de transmisores distintos. A pesar de que la forma de las curvas de la CDF es diferente en las dos series de resultados expuestos, las simulaciones son capaces de seguir la forma obtenida en las medidas para ambos casos, lo cual nos reafirma el potencial del trazado de rayos para el cálculo de capacidades.

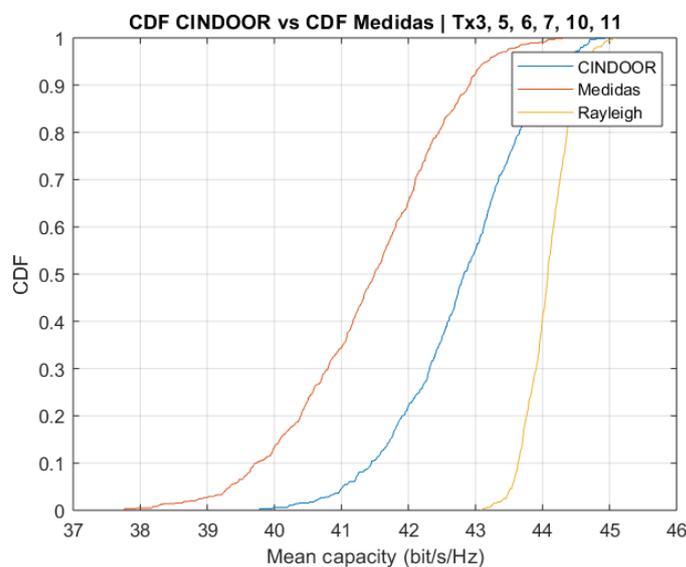


Figura 47. CDF de la capacidad para los transmisores 3, 5, 6, 7, 10 y 11

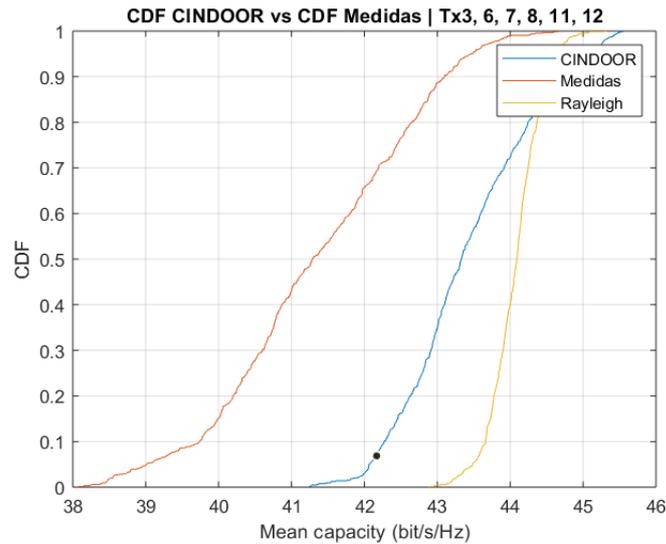


Figura 48. CDF de la capacidad para los transmisores 3, 6, 7, 8, 11 y 12

Los últimos análisis de CDF de la capacidad para la sala multiusuarios los realizaremos para 8 y para 10 usuarios activos. Como ya hemos mencionado anteriormente, las curvas de probabilidad acumulada que se obtienen son totalmente paralelas y conforme aumentamos los usuarios también aumenta la separación entre las curvas asociadas con medidas y simulaciones. Para un conjunto 8 transmisores activos, de acuerdo con los resultados que se muestran en la Figura 49, hay alrededor de 4 bit/s/Hz de diferencia entre las capacidades de canal obtenidas en medidas y simulaciones, siendo el valor proporcionado por CINDOOR superior al obtenido a partir de las medidas, y aproximándose más a la capacidad de un canal tipo Rayleigh.

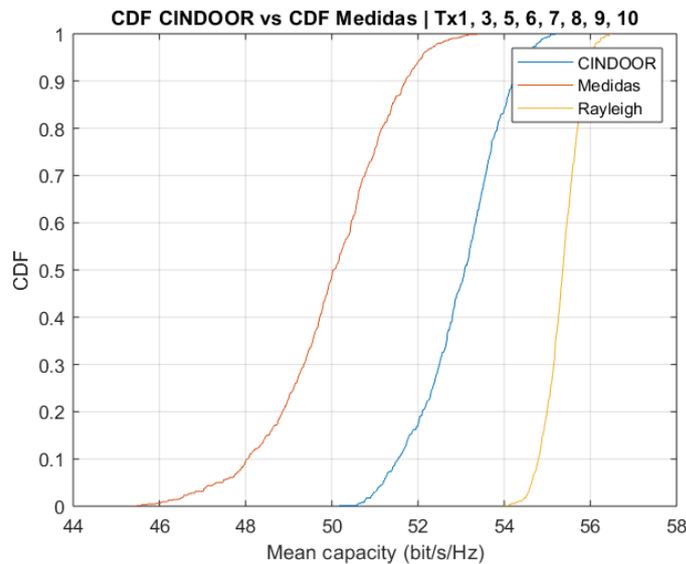


Figura 49. CDF de la capacidad para 8 transmisores activos.

En la Figura 50 se muestra el resultado obtenido para los 10 transmisores, coincidiendo con el caso de 10 usuarios simultáneamente activos en la celda y, en este caso, la diferencia máxima entre las capacidades obtenidas con CINDOOR y las medidas es de

7 bit/s/Hz. Como ya ocurría en los resultados mostrados previamente, las simulaciones estiman una capacidad de canal superior a la calculada a partir de las medidas experimentales y ligeramente inferior a la del canal tipo Rayleigh de referencia.

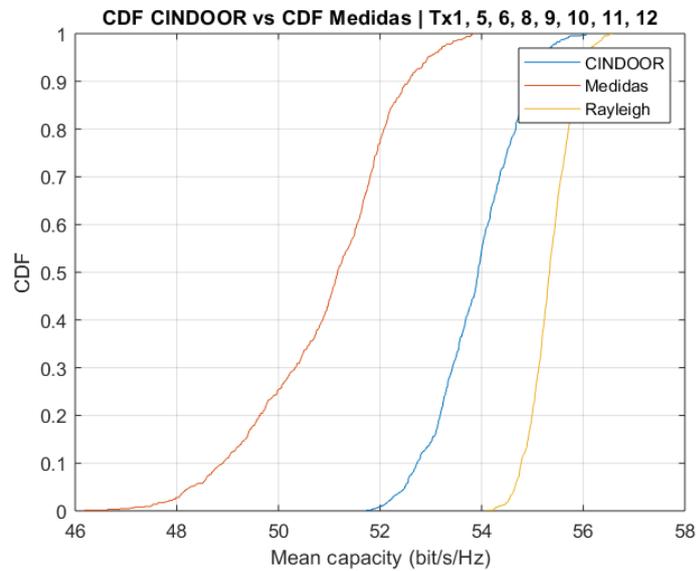


Figura 50. CDF de la capacidad para los 10 transmisores activos.

Se puede concluir que las simulaciones realizadas con CINDOOR proporcionan al usuario una estimación del canal muy precisa en términos de capacidades, siempre ofreciéndonos unos datos algo superiores a los medidos en el escenario propuesto. En la Figura 51 se ha representado una muestra de los resultados obtenidos para diferentes números de transmisores activos comparando simulaciones y medidas.

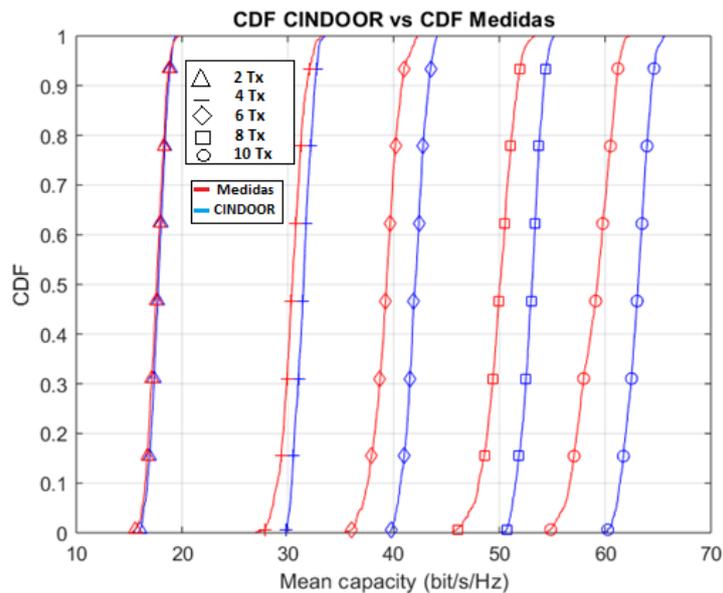


Figura 51. CDF de la capacidad para diferente número de transmisores activos.

Al aumentar el número de usuarios se incrementa la diferencia entre la capacidad simulada y la medida en términos absolutos, pero en términos relativos la diferencia es

similar para los diferentes números de usuarios simulados. Esta diferencia puede deberse al patrón de radiación simplificado utilizado en las simulaciones para incorporar el efecto de las antenas utilizadas.

4.1.3 Capacidad en función de la SNR

El siguiente análisis realizado para ahondar en la caracterización de canal es la evolución de la capacidad en función de la relación señal a ruido (SNR). Al igual que para el análisis de la CDF de la capacidad, se compararán en primera instancia los resultados extraídos a partir de las medidas con los obtenidos de las simulaciones cuando en este caso se consideran como mecanismos de acoplo entre antenas hasta la cuarta (R4) y séptima (R7) reflexión. Posteriormente, se analizarán los resultados obtenidos variando el número de transmisores activos, comparando el resultado simulado con el medido y con el canal tipo Rayleigh usado de referencia.

Como ya sucedió con la CDF de la capacidad, la diferencia observada entre la simulación hasta R7 y hasta R4 al analizar la dependencia con la SNR es despreciable, tal y como se observa en las Figuras 52 y 53. En ambas figuras se muestra el resultado obtenido en las simulaciones considerando un único transmisor. A la vista de los resultados, puede observarse cómo ambas curvas se sobrepone, no existiendo diferencia alguna que nos lleve a optar por una de las simulaciones frente a la otra.

Como en la sección anterior, se seleccionan las simulaciones realizadas hasta la séptima reflexión para los análisis posteriores ya que, aunque no existan apenas diferencias, proporcionan más información que optando por las realizadas hasta la cuarta reflexión. A continuación, se simuló la capacidad de la SNR para cada uno de los 10 transmisores, siendo cada uno de estos el único activo en cada caso, y el resultado obtenido es el representado en la Figura 54.

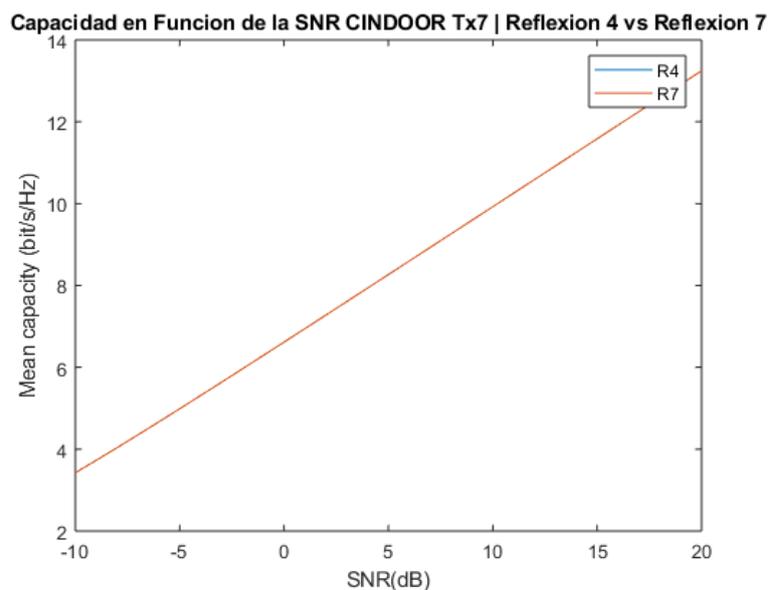


Figura 52. Capacidad en función de la SNR, comparativa entre R4 y R7 para el transmisor 7.

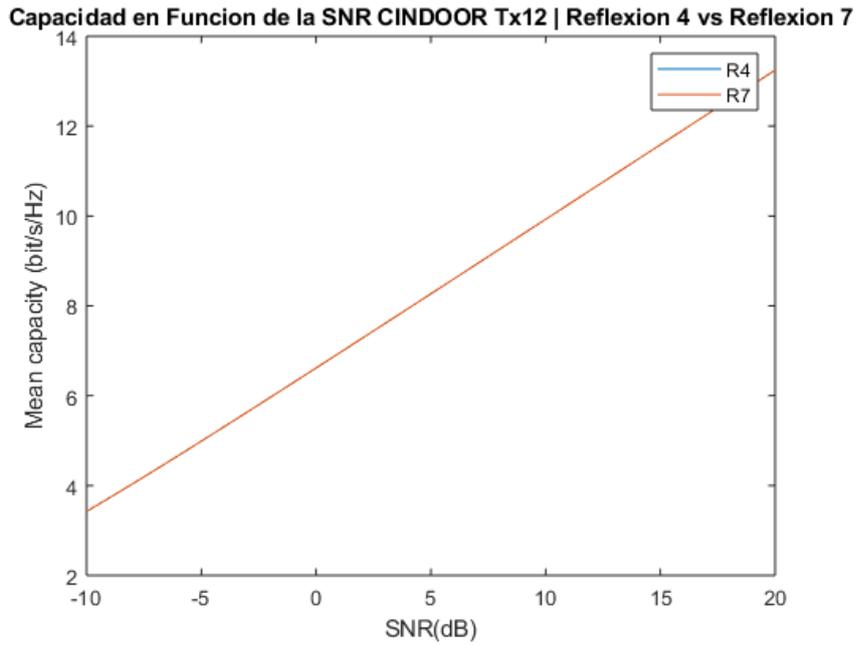


Figura 53. Capacidad en función de la SNR, comparativa entre R4 y R7 para el transmisor 12.

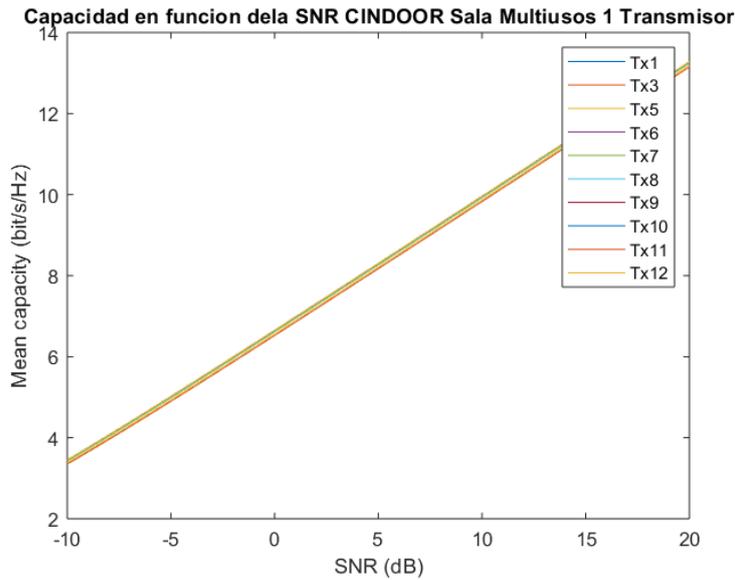


Figura 54. Capacidad en función de la SNR simulada para 1 transmisor activo.

Como complemento a los resultados obtenidos a partir de las simulaciones realizadas con CINDOOR, se ha repetido el proceso calculando en este caso los valores de capacidad de canal en función de la SNR pero, para las medidas realizadas en la sala multiusos, quedando representados los resultados asociados en la Figura 55, considerando de nuevo un único transmisor activo.

Como puede observarse por inspección de las Figuras 54 y 55, la diferencia entre las curvas de medidas y simulaciones va a ser aún más pequeña que la observada en las CDFs de la capacidad.

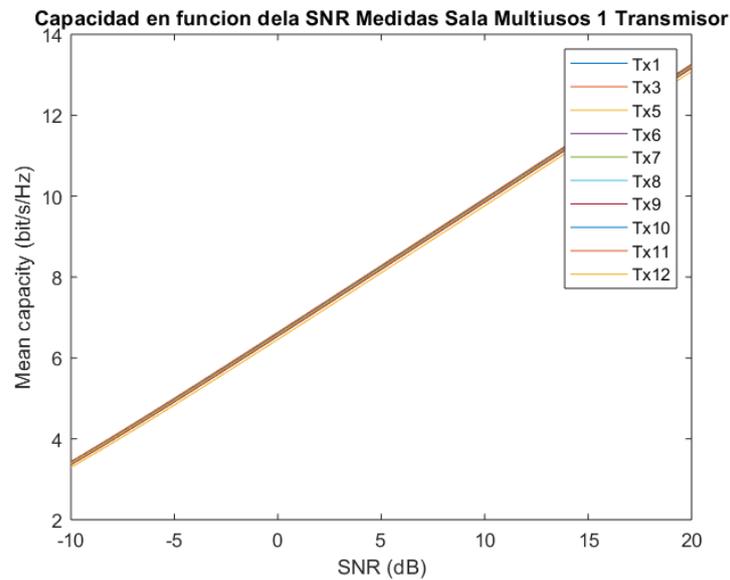


Figura 55. Capacidad en función de la SNR medida para 1 transmisor activo.

Comenzaremos el análisis centrándonos en algunos de los transmisores individualmente, especialmente en aquellos que presentaron menor y mayor diferencia para la CDF de la capacidad. Los transmisores situados en el centro de la sala fueron los que mejor resultado dieron en términos comparativos entre simulaciones y medidas y, entre éstos, el transmisor 8 fue uno en los que menor diferencia se encontró. En la Figura 56 se representa la evolución de la capacidad en función de la SNR siendo el transmisor 8 el único activo. La diferencia entre simulación y medida es muy pequeña, prácticamente se superponen ambas gráficas, ofreciendo un resultado muy similar al del canal Rayleigh de referencia. De este modo se reafirma el buen resultado obtenido para este punto en términos comparativos.

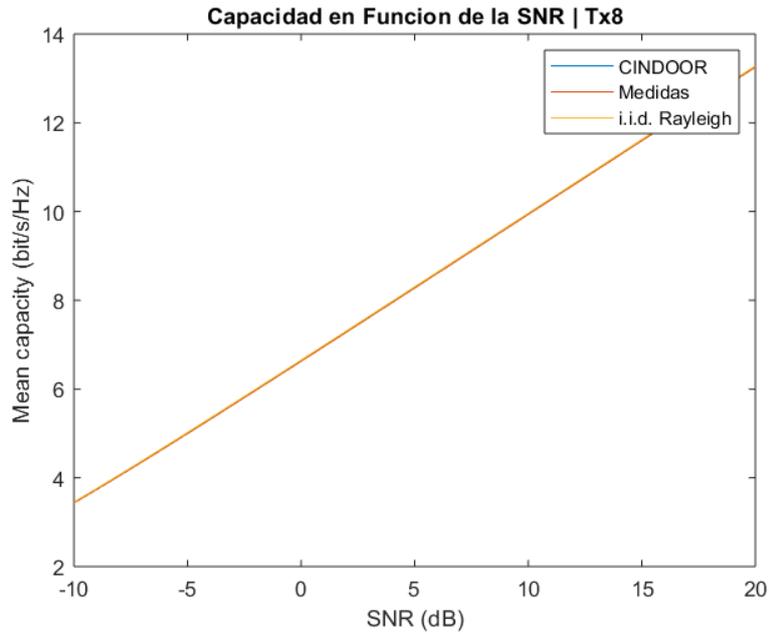


Figura 56. Capacidad en función de la SNR para el transmisor 8.

Por el contrario, uno de los transmisores para el que peor resultado se obtuvo en la comparativa entre simulaciones y medidas para la CDF de la capacidad fue el transmisor 6. La evolución de la capacidad en función de la SNR para el transmisor 6 puede observarse en la Figura 57. En este caso, las curvas no se superponen, pudiéndose apreciar una pequeña diferencia entre la simulación y la medida. La curva de la simulación de CINDOOR se superpone con la del canal Rayleigh, proporcionando una capacidad algo superior a la medida. La diferencia observada entre ambas curvas, en torno a 0.2 bit/s/Hz se mantiene constante para todos los valores de SNR.

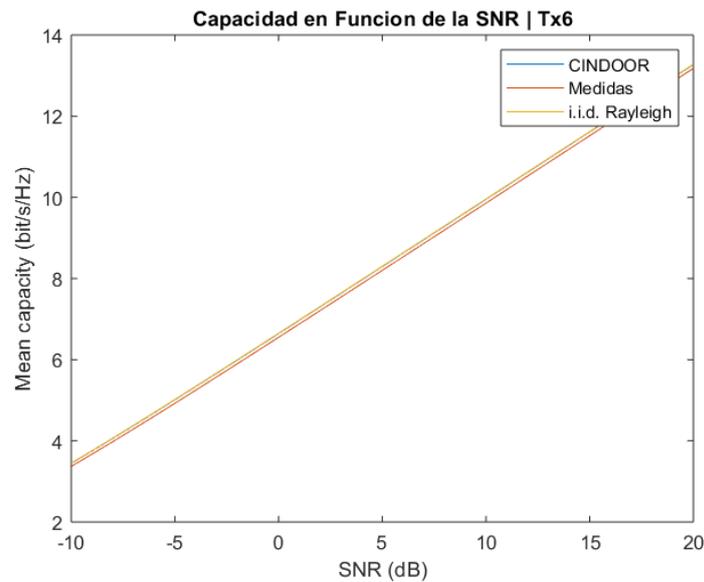


Figura 57. Capacidad en función de la SNR para el transmisor 6.

Esta tendencia a obtener un buen resultado en términos comparativos para los mismos transmisores que en el análisis de la CDF se mantiene para el resto de transmisores analizados. El transmisor 11 representado en la Figura 58 mostró una desviación muy pequeña en el análisis de la CDF, mientras que para el transmisor 9, representado en la Figura 59, la diferencia entre medidas y simulación fue mayor. Observando los resultados obtenidos, podemos afirmar que los transmisores que mostraron un peor comportamiento (en términos de ajuste entre simulaciones y medidas) lo mantienen pero la diferencia es más pequeña, al ser capacidades medias, que en análisis de la CDF realizado previamente. Otro aspecto que se observa es que para todos los transmisores la curva simulada prácticamente se superpone con la del canal Rayleigh de referencia.

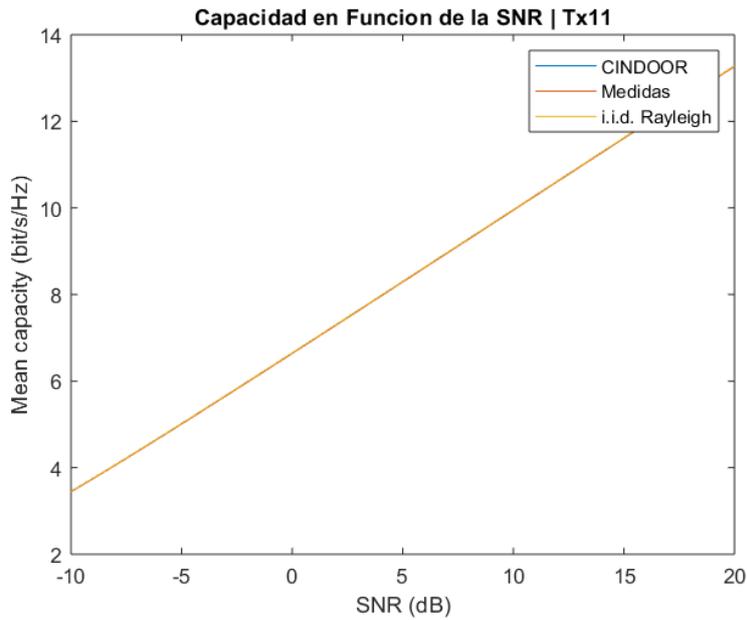


Figura 58. Capacidad en función de la SNR para el transmisor 11.

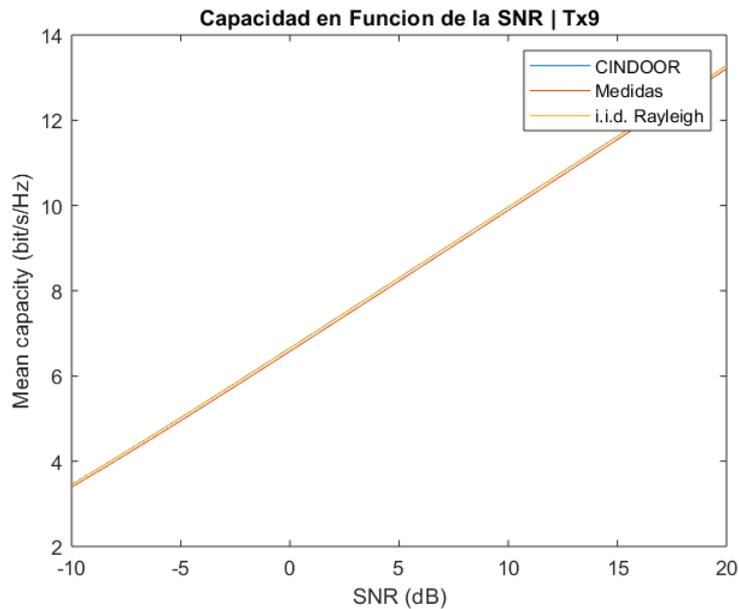


Figura 59. Capacidad en función de la SNR para el transmisor 9.

A continuación, iremos analizando el resultado obtenido al aumentar el número de transmisores activos en la sala multiusos. Al contar con dos transmisores activos ya se van separando ligeramente las gráficas de medidas y simulaciones, quedando la obtenida en las simulaciones con CINDOOR más cercana al canal Rayleigh de referencia que la de las medidas. Este fenómeno es el que la capacidad de las simulaciones se aproxima más a la de un canal tipo Rayleigh ya se apreció en el anterior análisis de la CDF. En la Figura 60 puede verse un ejemplo para el caso en el que los transmisores 5 y 6 están activos.

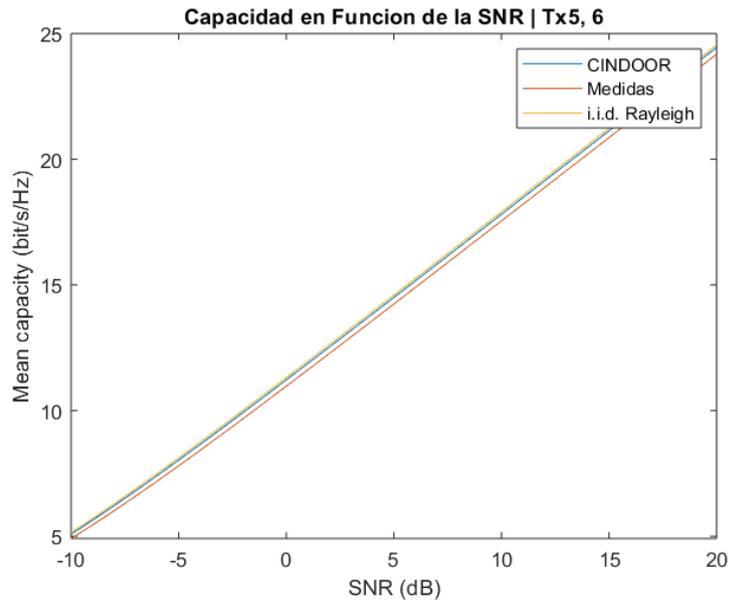


Figura 60. Capacidad en función de la SNR para los transmisores 5 y 6.

En el caso de los transmisores 5 y 6, la diferencia entre medidas y simulaciones es muy pequeña, inferior a 1 bit/s/Hz, quedando la curva de la simulación superpuesta sobre la del canal tipo Rayleigh. En otros resultados obtenidos para dos transmisores, las curvas se alejan algo más de la obtenida para el canal de referencia, pero manteniendo una distancia similar en términos de capacidad entre simulaciones y medidas. Para los transmisores 1 y 3, cuya representación se aprecia en la Figura 61, la capacidad simulada es algo inferior a la del canal Rayleigh, pero siempre superior a la medida. Este fenómeno que se viene observando a lo largo de todos los resultados seguirá presente en las siguientes representaciones.

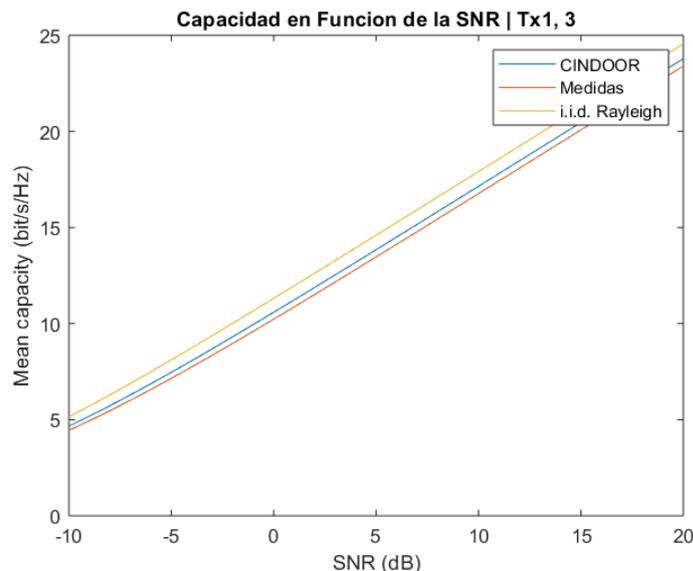


Figura 61. Capacidad en función de la SNR para los transmisores 1 y 3.

El análisis continúa pasando a incrementar hasta 5 el número de transmisores activos, y puede concluirse que la tendencia descrita con anterioridad se mantiene, obteniendo una capacidad superior para las simulaciones frente a las medidas y estando la capacidad del canal Rayleigh por encima de ambas. En la Figura 62 se presenta como ejemplo representativo el resultado obtenido cuando los transmisores 3, 5, 6, 10 y 11 son los que están activos.

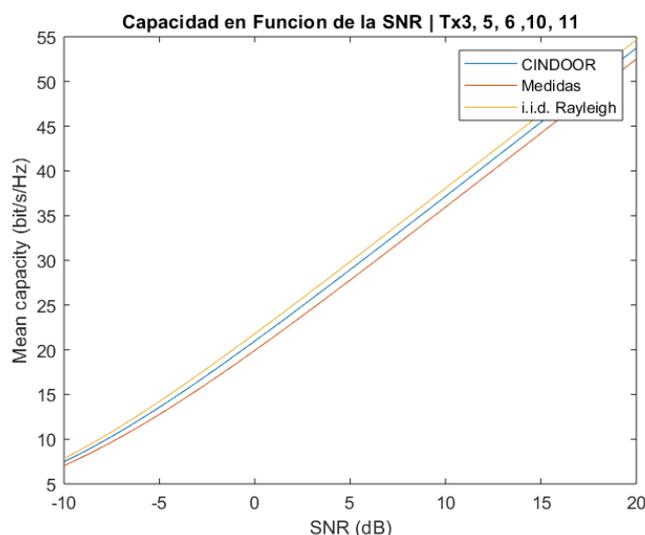


Figura 62. Capacidad en función de la SNR para los transmisores 3, 5, 6, 10 y 11.

A la vista de los resultados, se puede apreciar cómo para bajas SNR la diferencia de capacidad entre simulaciones y medidas es menor en términos absolutos, tendiendo a aumentar con la relación señal a ruido. Para 5 transmisores activos, la diferencia se sitúa por debajo de 1 bit/s/Hz para -10dB de SNR y aumenta hasta los 2 bit/s/Hz para 20dB de SNR. Otro ejemplo con 5 transmisores activos se presenta en la Figura 63, siendo éste

otro de los casos que muestran un comportamiento similar, donde simulaciones y Rayleigh prácticamente se superponen, quedando por debajo la capacidad medida.

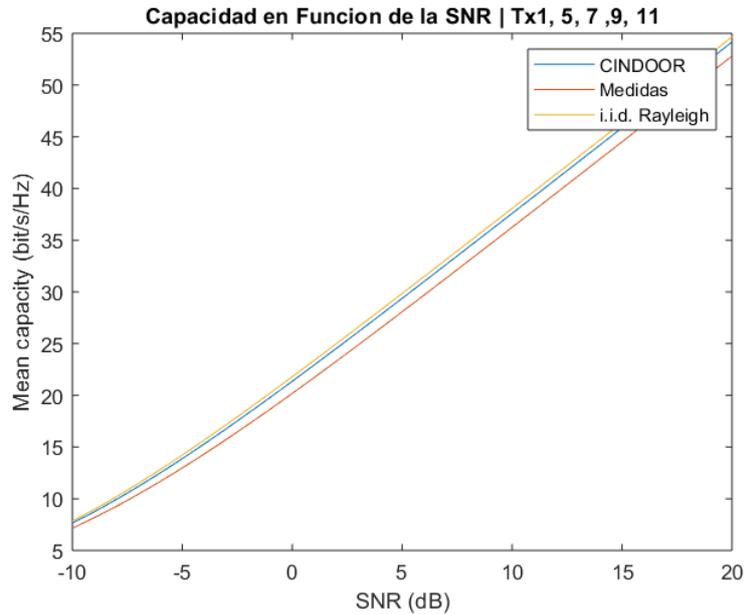


Figura 63. Capacidad en función de la SNR para los transmisores 1, 5, 7, 9 y 11.

Por último, se analizará el comportamiento para 8 y 10 transmisores activos, obteniendo resultados muy similares independientemente de la combinación de transmisores seleccionada. En la Figura 64 puede observarse un ejemplo para 8 transmisores activos donde, al igual que sucedía previamente, las medidas nos proporcionan la capacidad más baja, situándose la simulada en un punto medio entre medidas y el canal Rayleigh de referencia. La diferencia entre la capacidad simulada y medida puede llegar a los 5 bit/s/Hz para los valores de SNR más altos, permaneciendo en torno a 2 bit/s/Hz para los más bajos.

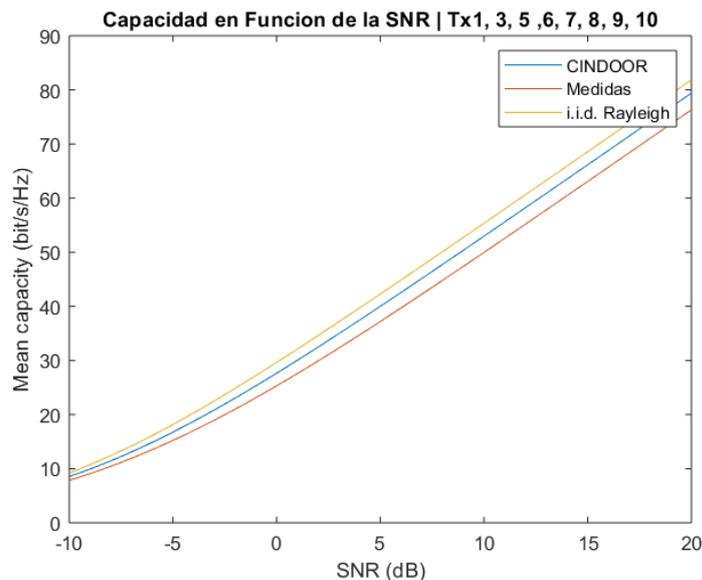


Figura 64. Capacidad en función de la SNR para 8 transmisores activos.

Se obtiene un resultado similar con los 10 transmisores activos, donde las capacidades simuladas y medidas tienden a diferenciarse más en términos absolutos cuanto mayor es la SNR, superando los 5 bit/s/Hz para 20dB de SNR, como se aprecia en la Figura 65.

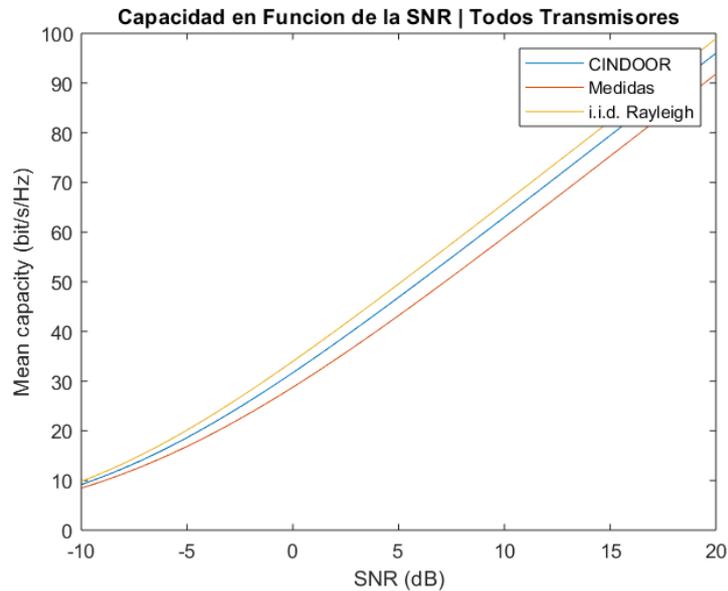


Figura 65. Capacidad en función de la SNR para los 10 transmisores activos.

Los resultados presentados muestran una gran exactitud en el cálculo de las capacidades a partir de las simulaciones realizadas en CINDOOR, observándose una tendencia a sobrestimar la capacidad si se compara con la medida realizada en el mismo punto.

4.2 Salón de Actos

Una vez demostrada la eficacia del trazado de rayos para el análisis de la capacidad en escenarios MIMO interiores, el siguiente paso será el análisis en un entorno donde, por su complejidad, no se ha podido realizar una campaña de medidas. El escenario escogido es el salón de actos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y Telecomunicaciones, cuyo interior se muestra en la Figura 66.



Figura 66. Vista trasera del salón de Actos de la ETSIIT.

Esta estancia cuenta con 11 filas de asientos separadas por un pasillo central. En el fondo se sitúa una mesa presidencial, situada sobre un altillo y toda la sala se encuentra dispuesta de forma escalonada.

En las siguientes secciones se va a presentar el modelo propuesto para el análisis del salón de actos, así como la configuración utilizada, para posteriormente pasar a analizar los resultados obtenidos con la herramienta de simulación. Se analizará, al igual que en la sección anterior, la CDF de la capacidad y la evolución de la capacidad media en función de la SNR.

4.2.1 Entorno y Configuración

Para la simulación del salón de actos se ha optado por dos modelos, al igual que se hizo en la sala multiusos: uno más complejo sobre el que modelar la propagación considerando en lo que a las reflexiones se refiere hasta el tercer orden (R3), y otro más sencillo para tener en cuenta posibles contribuciones significativas del multicamino a la potencia total, en este caso la cuarta (R4) y quinta reflexión (R5). Para el modelo más completo, representado en la Figura 67, se utilizaron un total de 693 placas planas y son necesarios en torno a 530 s para la simulación en un único punto hasta la tercera reflexión.

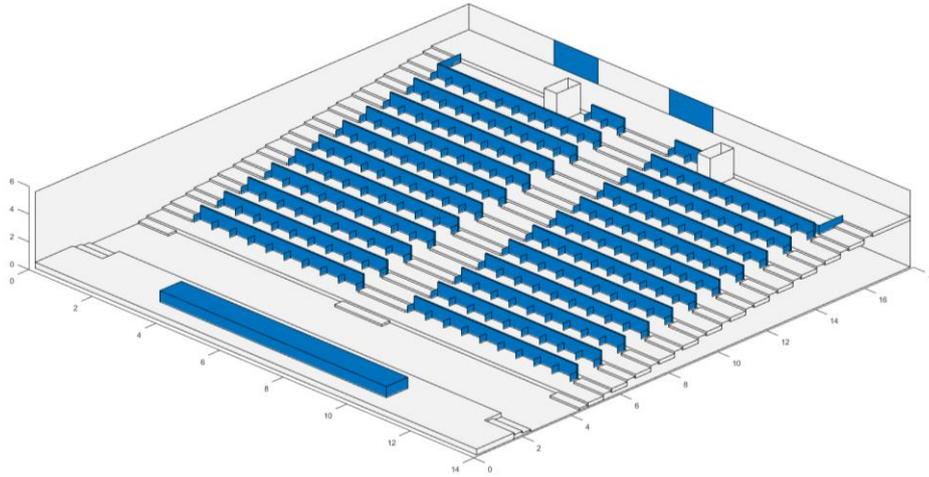


Figura 67. Modelo Completo del Salón de Actos.

Para la simulación de la cuarta y quinta reflexión se utilizó el modelo simplificado representado en la Figura 68. Este modelo está formado por 75 placas y para el cálculo de la potencia en un punto considerando únicamente solo el efecto de la cuarta y quinta reflexión, son necesarios alrededor de 775 s.

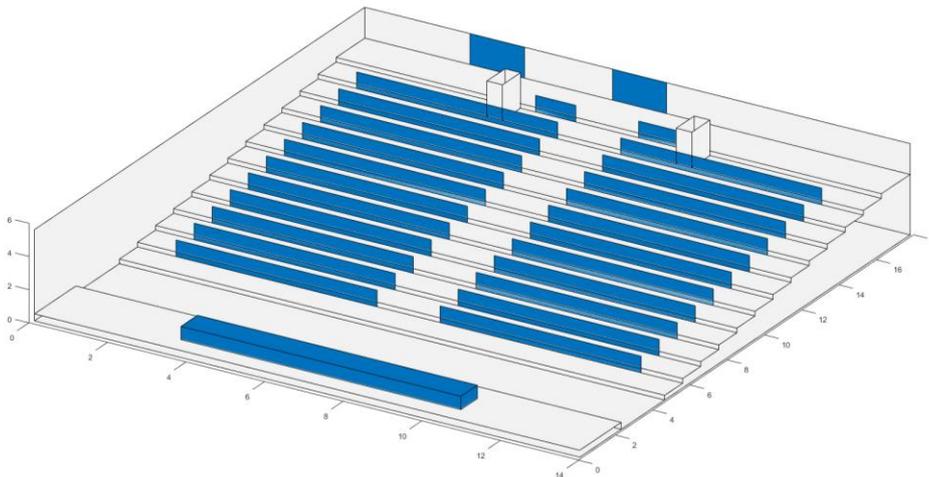


Figura 68. Modelo Simplificado del Salón de Actos.

Los tiempos de simulación expuestos nos permiten entender por qué se opta por un modelo simplificado para la simulación de las reflexiones de orden más alto. Aún simulando únicamente la 4ª y 5ª reflexión y utilizando el modelo simplificado el tiempo necesario es superior al empleado para el resto de los fenómenos de acoplo en el escenario complejo. Por la complejidad del escenario objeto de estudio se optó por simular hasta la 3ª y 5ª reflexión, ya que aumentar hasta la 7ª como en la sala multiusos incrementaría mucho el tiempo de simulación. Además, contábamos con la experiencia del escenario de referencia donde se apreció que a partir de la cuarta reflexión la aportación es prácticamente despreciable para el cálculo de capacidades.

El trazado de rayos para un transmisor sobre cada uno de estos modelos puede observarse en la Figura 69 para el modelo complejo y en la Figura 70 para el simplificado.

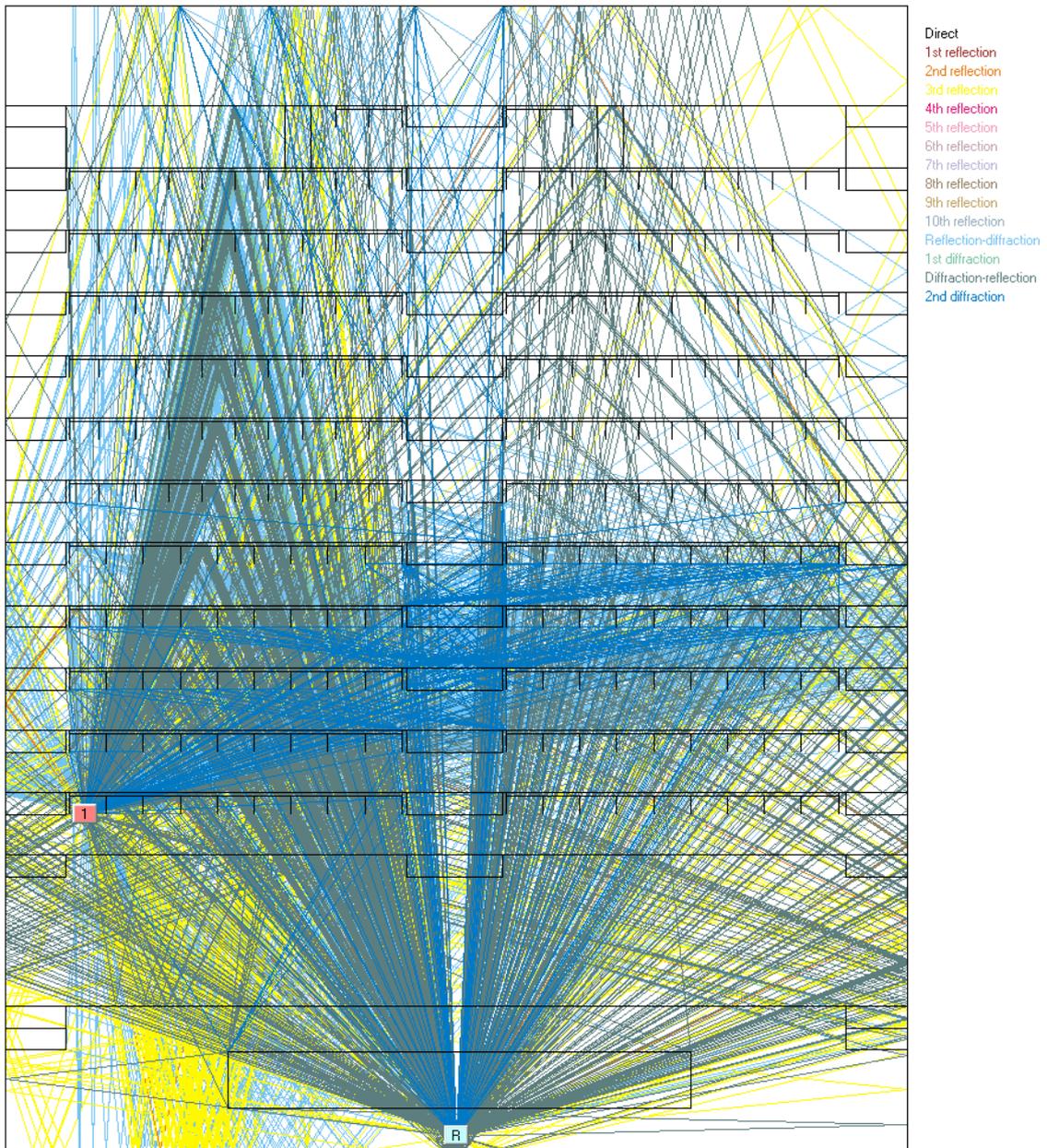


Figura 69. Trazado de rayos hasta la tercera reflexión en el modelo completo del salón de actos.

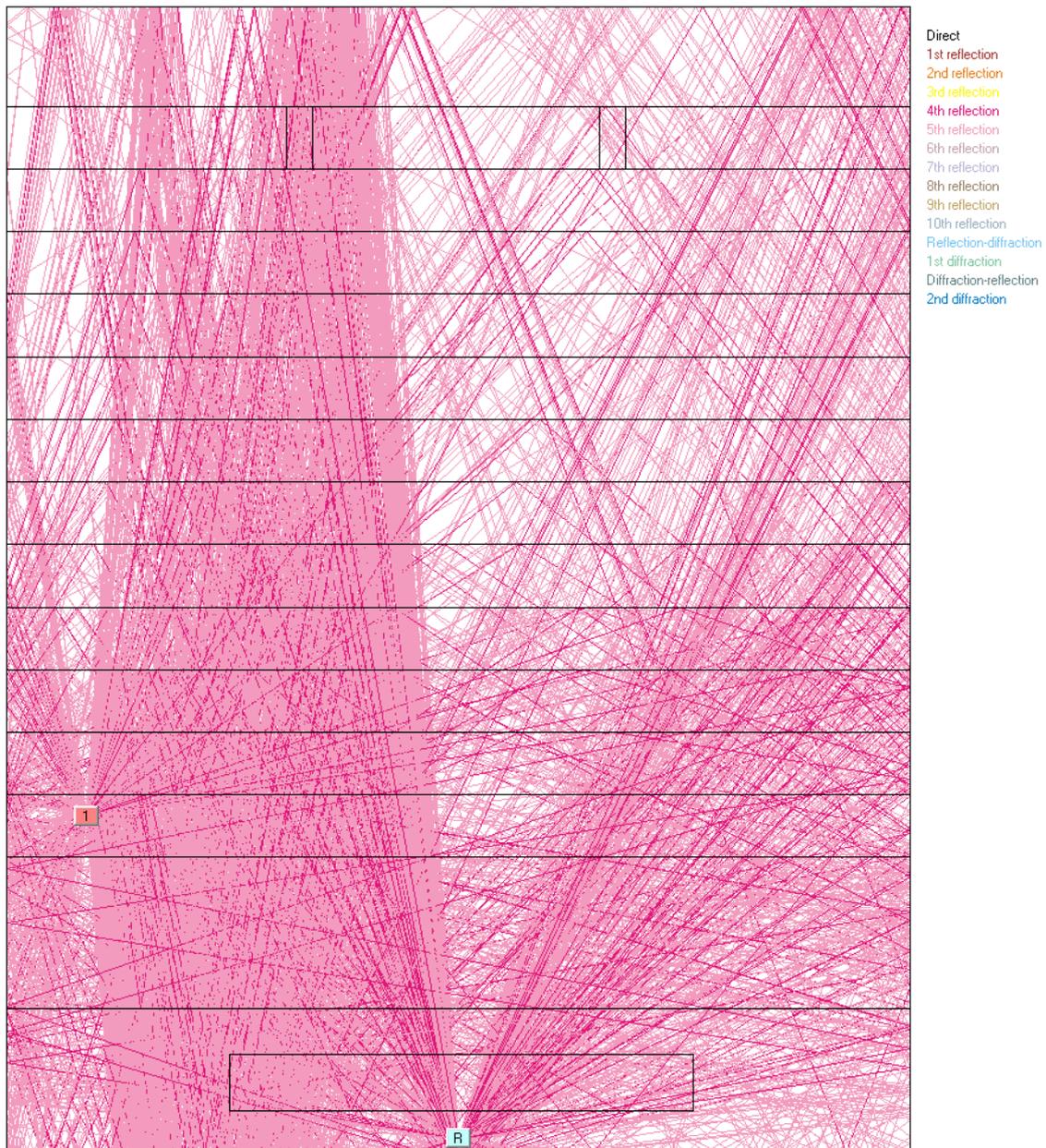


Figura 70. Trazado de rayos para la cuarta y quinta reflexión en el modelo simplificado del salón de actos.

Sobre este modelo se situaron 18 transmisores distribuidos sobre las 11 filas de butacas siguiendo la distribución mostrada en la Figura 71. A su vez, se colocó el array receptor detrás de la mesa presidencial, de tal forma que el punto central del array se encuentra en las coordenadas (7.0, 0.4, 2.2), a algo más de 2 m del suelo. En la Tabla 5 se resumen las coordenadas exactas de cada uno de los 18 transmisores considerados para llevar a cabo el estudio.

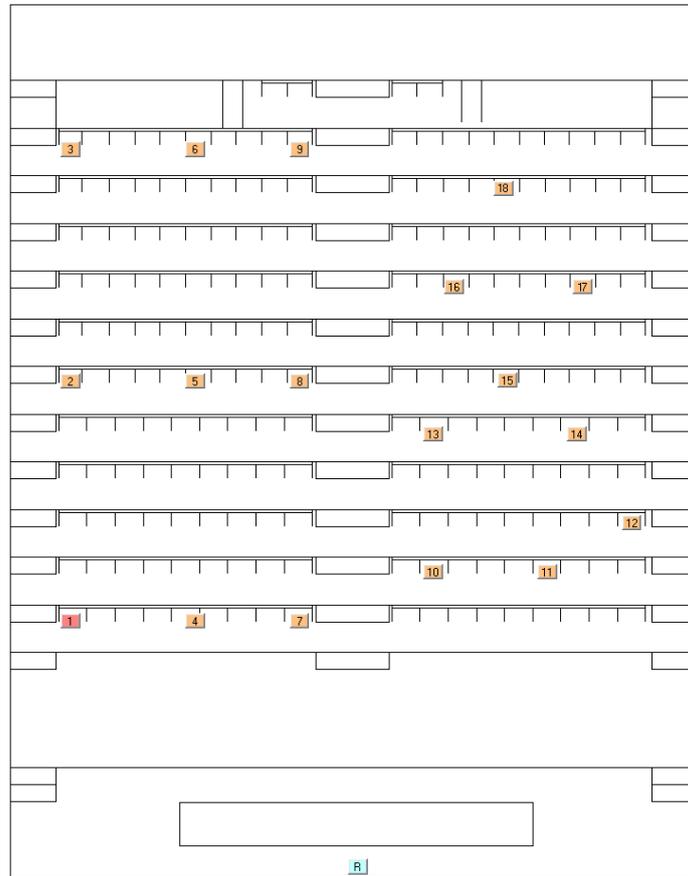


Figura 71. Vista superior del posicionamiento de transmisores y array receptor sobre el salón de actos.

Tabla 5. Coordenadas de los puntos de medida.

Transmisor	x (metros)	y (metros)	z (metros)
1	1.28	5.4	0.8
2	1.28	10.28	2.2
3	1.28	15.0	3.6
4	3.8	5.4	0.8
5	3.8	10.28	2.2
6	3.8	15.0	3.6
7	5.9	5.4	0.8
8	5.9	10.28	2.2
9	5.9	15.0	3.6
10	8.6	6.4	1.2
11	10.9	6.4	1.2
12	12.6	7.4	1.6
13	8.6	9.2	2.2
14	11.5	9.2	2.2
15	10.1	10.3	2.6
16	9.0	12.2	2.8
17	11.6	12.2	2.8
18	10.0	14.2	3.6

Para cada uno de los puntos del array receptor se modeló la propagación considerando como mecanismos de acoplo entre antenas, la contribución de los rayos directo, los reflejados hasta la quinta reflexión, los difractados y doblemente difractados, los difractados-reflejado y reflejados-difractados.

Se simuló a la frecuencia central de 3.5 GHz al igual que en la sala multiusos. Para el array receptor se utilizó una separación entre elementos de 0.5λ a la frecuencia de 3 GHz. Las antenas empleadas fueron la antena directiva de Hyperlink para emular cada elemento del array y el dipolo eléctrico elemental para cada uno de los transmisores. Como se aprecia, la configuración empleada es la misma que la ya utilizada con anterioridad en la sala multiusos, lo que servirá para comparar las capacidades obtenidas en cada una de las estancias.

Para todas las representaciones mostradas a lo largo de la sección, se ha considerado una relación señal a ruido igual a 10 dB, y a su vez se ha optado por utilizar la normalización de usuario explicada en capítulos previos.

4.2.2 CDF de la Capacidad

Vamos a comparar en primera instancia las diferencias en la CDF de la capacidad entre las simulaciones realizadas hasta R3 y hasta R5. Para ello, en la Figura 72 se representa como ejemplo representativo la CDF de la capacidad obtenida con CINDOOR para el transmisor 5 con las simulaciones realizadas hasta la tercera y la quinta reflexión.

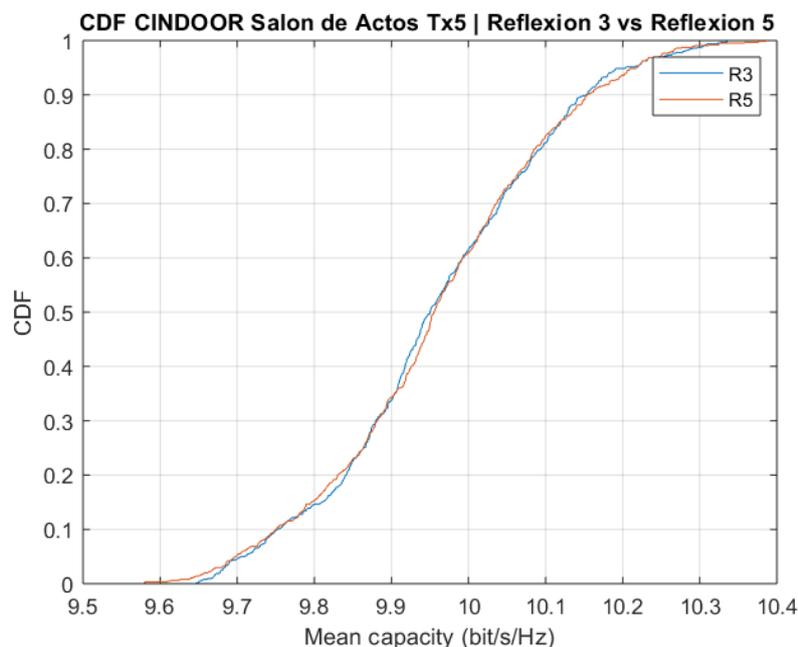


Figura 72. CDF de la capacidad para el transmisor 5, comparativa entre R3 y R5.

La diferencia en el resultado obtenido en ambas simulaciones (hasta R3 o hasta R5) es mínima. De forma análoga con lo ya observado para el escenario anterior, las primeras reflexiones tienen un peso muy importante en la capacidad, haciendo que de la R3 en adelante sean prácticamente despreciables. Este resultado se ratifica al analizar cada uno

de los transmisores individualmente; sirva la simulación del transmisor 11 representado en la Figura 73 como ejemplo. En lo sucesivo, se utilizarán las simulaciones realizadas hasta la 5ª reflexión para el análisis del canal en el salón de actos.

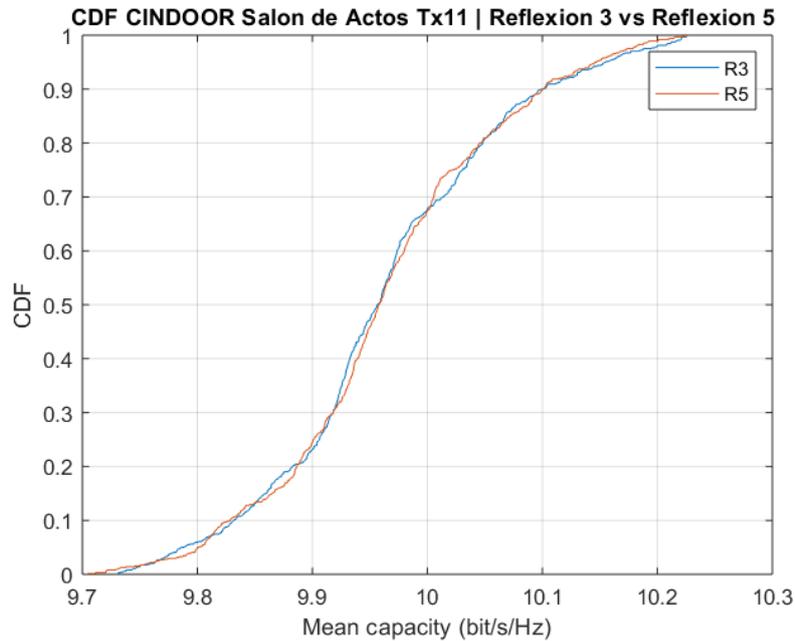


Figura 73. CDF de la capacidad para el transmisor 11, comparativa entre R3 y R5.

A continuación, se van a presentar los resultados obtenidos en función del número de transmisores activos, comenzando por analizar la CDF de la capacidad para un único transmisor. En este sentido, la Figura 74 muestra las curvas obtenidas con los 18 transmisores, con una capacidad similar en su valor mediano, en torno a los 9.95 bit/s/Hz.

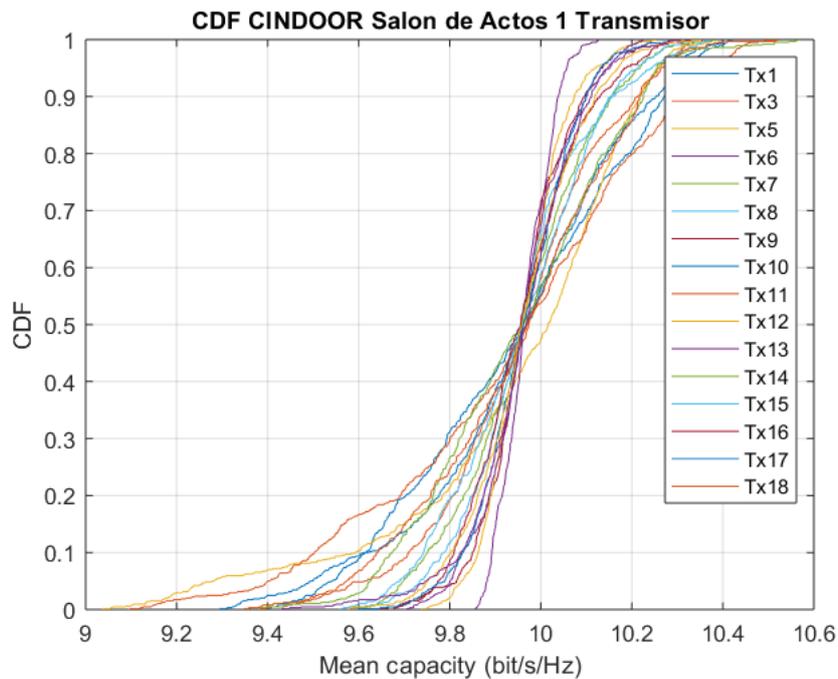


Figura 74. CDF de la capacidad para un transmisor activo.

Aumentamos progresivamente el número de transmisores activos y comparamos el resultado obtenido con el de un canal Rayleigh. Se observa analizando el resultado que el comportamiento del canal es muy similar al de un canal Rayleigh, tal y como se muestra en la Figura 75 para el caso de 3 transmisores activos.

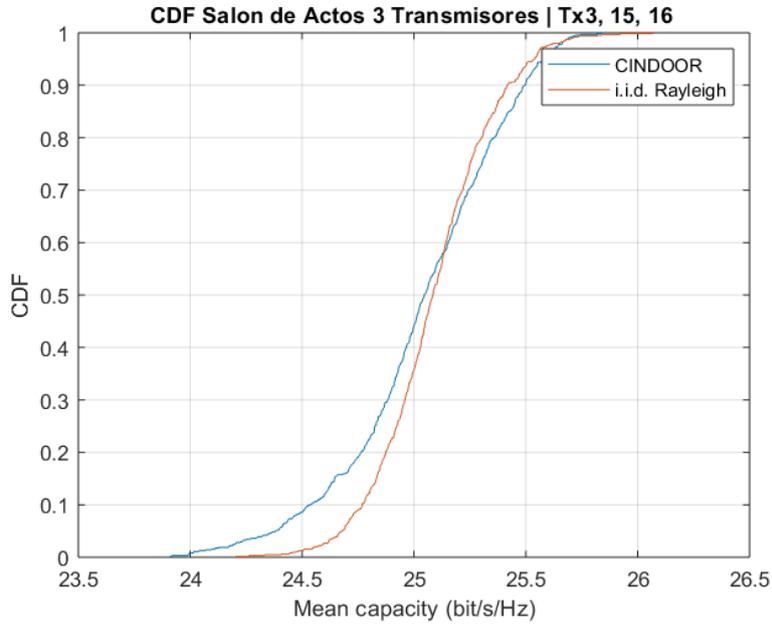


Figura 75. CDF de la capacidad para tres transmisores activos.

El resultado obtenido no sufre una gran variabilidad independientemente de la combinación de transmisores seleccionada, y para respaldar esta afirmación de forma gráfica, se ha optado por representar de forma conjunta 50 combinaciones de transmisores en una misma gráfica, tal y como se presenta en la Figura 76 para 4 transmisores activos.

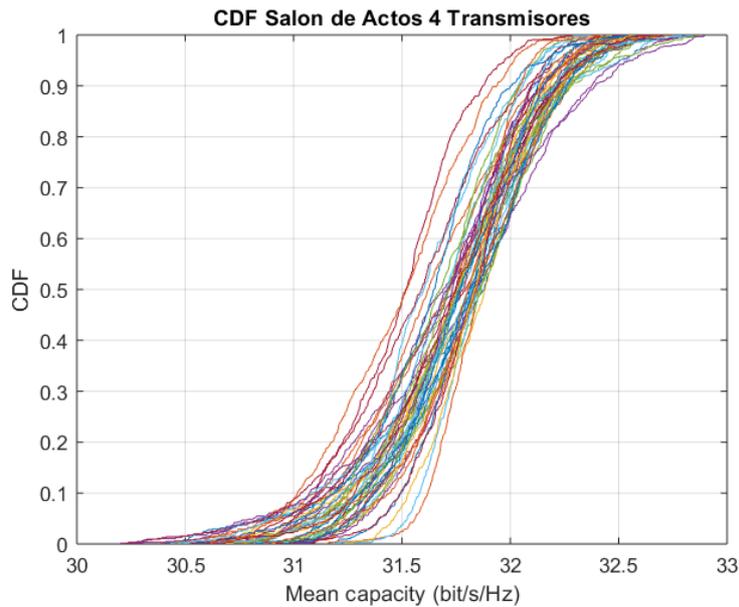


Figura 76. CDF de la capacidad para cuatro transmisores activos.

Si tomamos como referencia en la comparativa el valor mediano, la diferencia máxima entre las diferentes combinaciones representadas es de 0.5 bit/s/Hz en el peor caso, lo que nos confirma la poca diferencia existente entre las diferentes combinaciones de transmisores.

Para ocho transmisores comparamos de nuevo la capacidad obtenida con la del canal Rayleigh y se reafirma la gran similitud ya observada previamente. Como se representa en la Figura 77, la diferencia entre el canal simulado y el Rayleigh para el valor mediano de capacidad está en torno a los 0.2 bit/s/Hz.

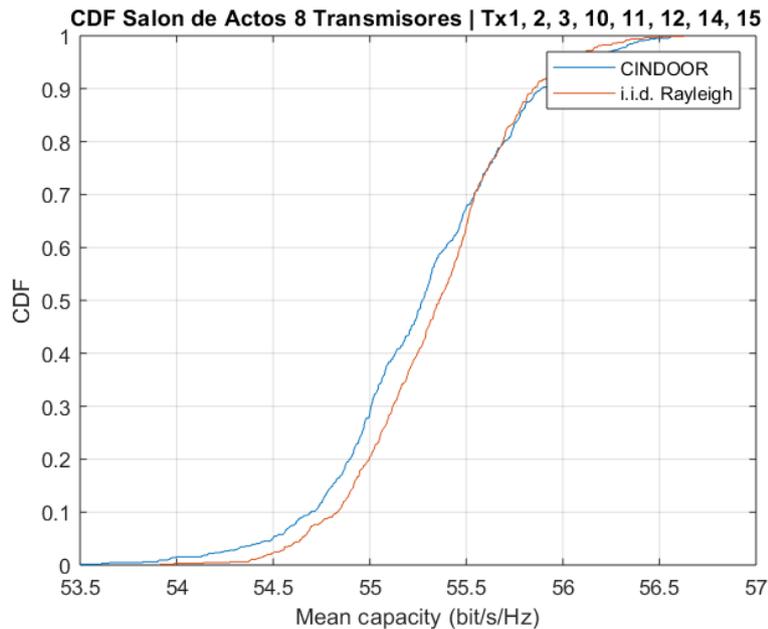


Figura 77. CDF de la capacidad para ocho transmisores activos.

Al subir el número de transmisores activos, un experimento interesante puede ser comparar la capacidad ahora obtenida por ejemplo con 8 transmisores activos, con la obtenida en la sala multiusos para el mismo número de transmisores. En este sentido, en la Figura 78 se compara la capacidad de ambos escenarios para 8 transmisores activos. Se aprecia que la capacidad obtenida en el salón de actos es superior a la de la sala multiusos, la diferencia mostrada es de en torno a 2 bit/s/Hz para el valor mediano.

El salón de actos muestra un canal más favorable, permitiendo obtener capacidades más elevadas que en la sala multiusos, acercándose mucho a la capacidad proporcionada por un canal Rayleigh.

Se continúa aumentando el número de transmisores activos en el salón de actos y observando la variabilidad en los resultados obtenidos dependiendo de la combinación de transmisores escogida. Como se aprecia en la Figura 79 para 14 transmisores activos, entre las 50 combinaciones seleccionadas se observa una diferencia máxima de capacidad para el valor mediano de 1.2 bit/s/Hz, algo superior a los 0.5 bit/s/Hz obtenidos para el caso de cuatro transmisores activos. Aun así, la variabilidad es muy pequeña ya que los valores de capacidad obtenidos para este número de transmisores rondan los 84.5 bit/s/Hz, lo que nos da una variabilidad de entorno al 1.4% para el valor mediano.

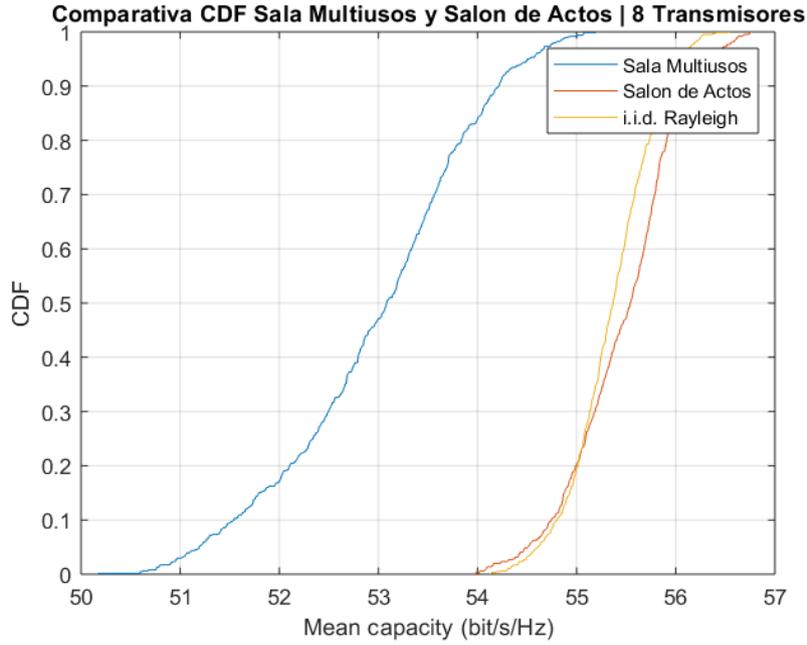


Figura 78. CDF de la capacidad para ocho transmisores activos, comparativa entre la sala multiusos y el salón de actos.

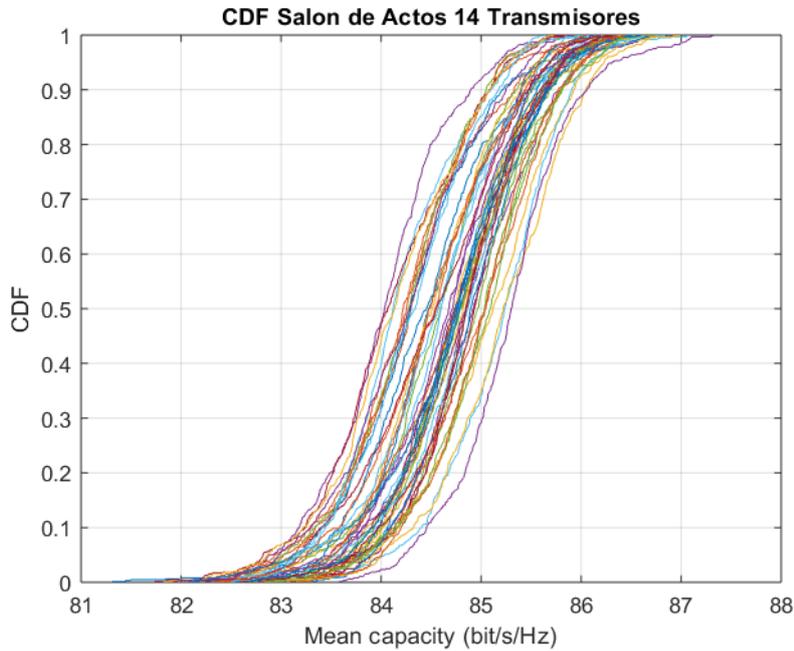


Figura 79. CDF de la capacidad para 14 transmisores activos.

Por último, en la Figura 80 se muestra la CDF de la capacidad del canal cuando los 18 transmisores considerados están activos. Se puede volver a afirmar en este caso que el canal obtenido para el salón de actos presenta un comportamiento muy similar a un canal tipo Rayleigh, siendo la diferencia para los 18 transmisores activos inferior a 1 bit/s/Hz para el valor mediano.

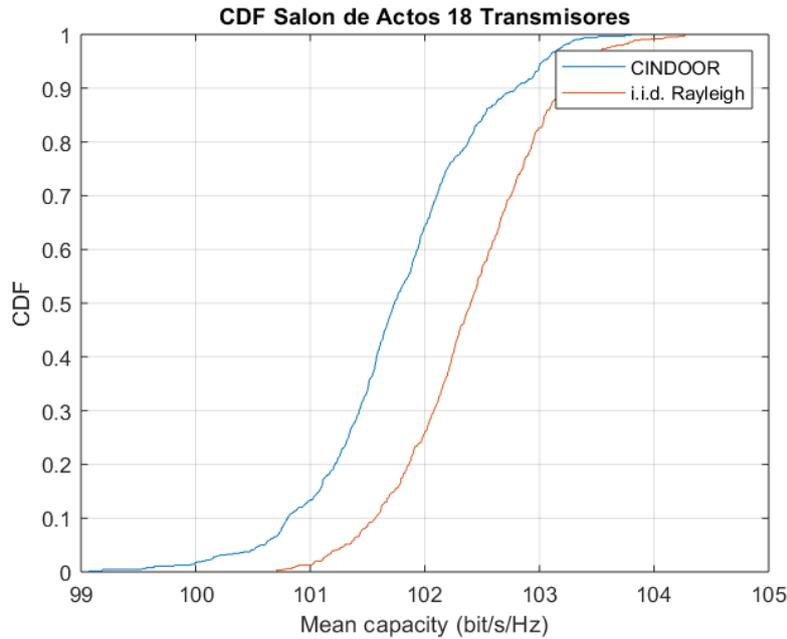


Figura 80. CDF de la capacidad para los 18 transmisores activos.

El análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas sobre el escenario bajo estudio permite concluir que el canal ofrece unos resultados que se aproximan al de un canal tipo Rayleigh, a diferencia de lo que ocurría entre medidas y simulaciones en la sala multiusos, con valores de capacidad bastante inferiores. Esto nos indica que la propagación en este segundo escenario es mucho más favorable que en el primero, permitiéndonos obtener capacidades más elevadas para un mismo número de transmisores activos.

4.2.3 Capacidad en función de la SNR

Para el análisis de la capacidad en función de la SNR se va a seguir una estructura similar a la propuesta en el apartado anterior para la CDF de la capacidad de canal. En primer lugar, se analizará la diferencia entre simular hasta la 3ª o 5ª reflexión para, posteriormente, comentar los resultados obtenidos aumentando progresivamente el número de transmisores activos.

Como se observó en los análisis llevados a cabo previamente, la diferencia entre las simulaciones realizadas hasta R3 y las que llegan hasta R5 es mínima. Esta conclusión se puede extender a los resultados obtenidos en esta sección. En la Figura 81 se representa la evolución de la capacidad en función de la SNR para el transmisor 11. Ambas curvas se superponen, no existiendo una diferencia apreciable entre las simulaciones realizadas con CINDOOR considerando hasta la tercera reflexión y las realizadas considerando las contribuciones hasta las reflexiones de quinto orden.

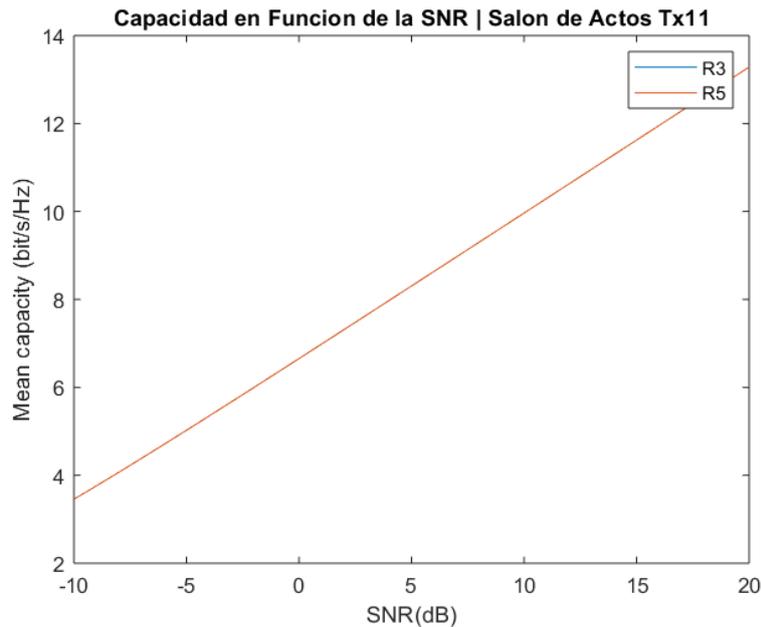


Figura 81. Evolución de la capacidad en función de la SNR para el transmisor 11. Comparativa entre R3 y R5.

Este resultado es una muestra representativa de los que se han obtenido para el resto de transmisores, para los que la curva de capacidad de R3 y R5 también se superponen. Seguiremos optando en esta sección por presentar los resultados considerando en las simulaciones el caso de trabajar con el mayor número de reflexiones (hasta R5).

En la Figura 82 se representa la evolución de la capacidad en función de la SNR considerando por separado cada uno de los 18 transmisores como el único activo en cada caso. Se han representado las 18 curvas sobre la misma grafica a modo de facilitar la comparativa en una primera aproximación. En la figura puede apreciarse la similitud en la capacidad obtenida para todos los transmisores.

Los resultados obtenidos en este último estudio han sido muy similares, independientemente del transmisor o combinación de transmisores seleccionados, por lo que se ha optado por representar varias combinaciones de transmisores sobre una misma gráfica. En la Figura 83 se representa la evolución de la capacidad en función de la SNR para 7 transmisores activos simultáneamente. Apenas hay 1 bit/s/Hz de diferencia máxima entre las diferentes combinaciones de transmisores representadas.

En ese barrido creciente que se está haciendo en función del número de usuarios/transmisores activos, se procede ahora a comparar los resultados aquí obtenidos con los resultados de un canal tipo Rayleigh y los obtenidos en las simulaciones en la sala multiusuarios, considerando el caso de 10 transmisores activos; resultados que pueden observarse en la Figura 84. La capacidad media obtenida en el salón de actos es prácticamente idéntica a la ofrecida por un canal Rayleigh, como ya venía observándose en el análisis de la CDF. La capacidad de la sala multiusuarios es inferior a la del salón de actos, diferenciándose en 5 bit/s/Hz para las relaciones señal a ruido más elevadas.

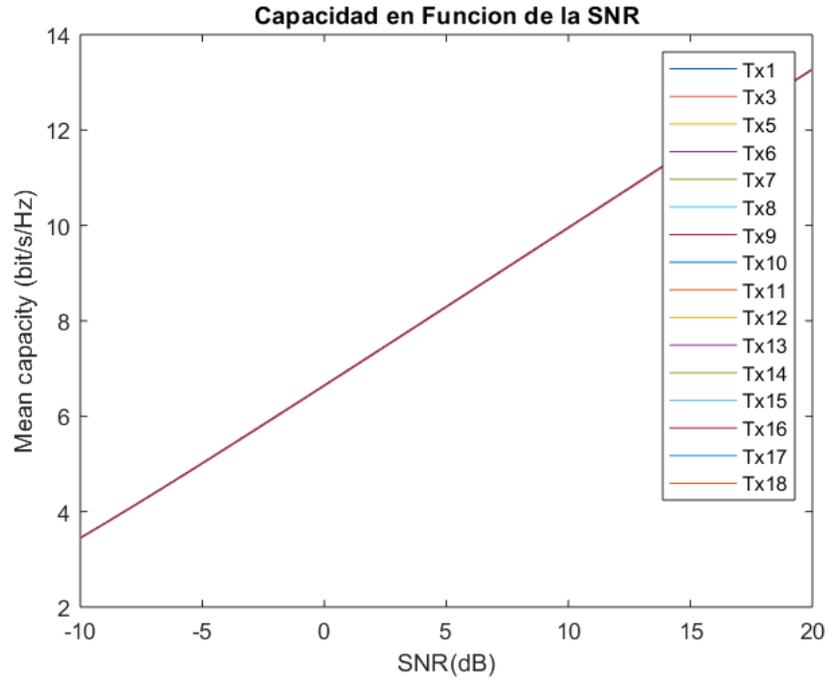


Figura 82. Capacidad en función de la SNR considerando cada transmisor por separado como el único activo.

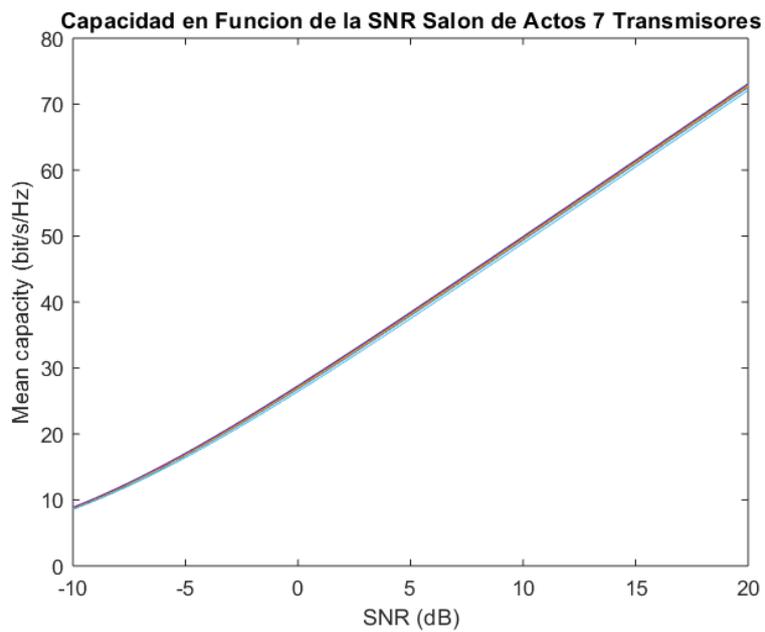


Figura 83. Capacidad en función de la SNR para 7 transmisores activos.

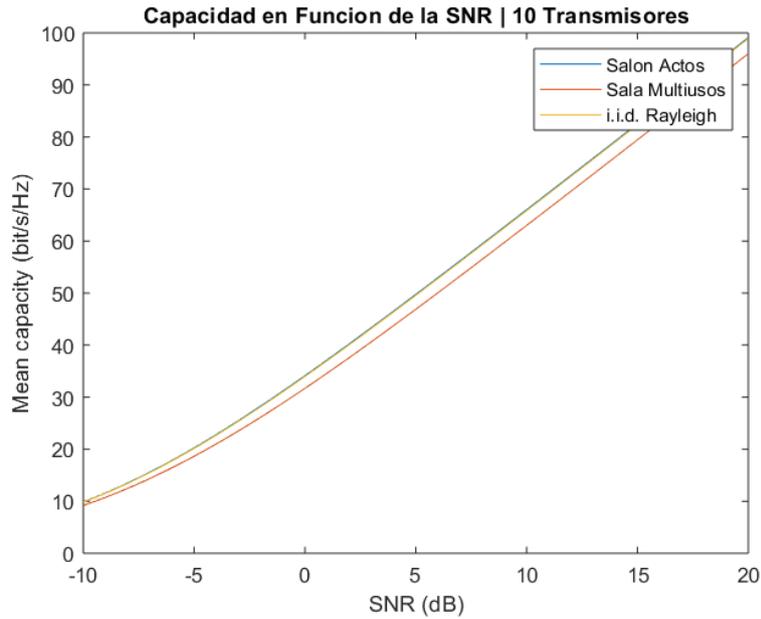


Figura 84. Capacidad en función de la SNR para 10 transmisores activos. Comparativa entre el salón de actos y la sala multiusos.

Por último, en la Figura 85 se muestran los resultados para un total de 17 transmisores activos. La tendencia previamente comentada se mantiene y es que para todas las diferentes combinaciones de transmisores seleccionadas, la capacidad obtenida es similar.

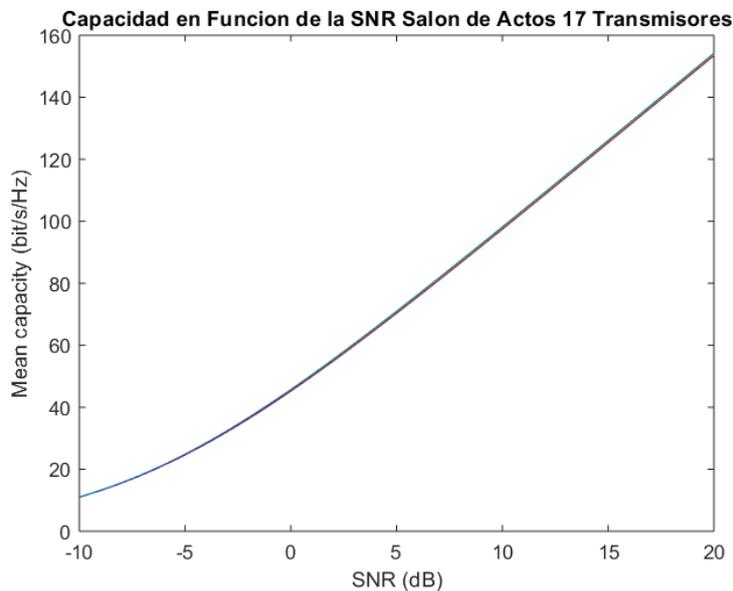


Figura 85. Capacidad en función de la SNR para 17 transmisores activos.

De acuerdo con los resultados expuestos y tal y como ya se concluyó para el análisis de la CDF de la capacidad de canal en la subsección 4.2.2, el salón de actos presenta un entorno de propagación muy favorable, permitiendo obtener capacidades superiores a las simuladas para la sala multiusos. A su vez, los resultados obtenidos en las simulaciones se asemejan a los correspondientes a con un canal Rayleigh en términos de capacidad. La variabilidad de los valores de capacidad con la posición de los transmisores en la sala es

mínima, como ha quedado demostrado al analizar diferentes combinaciones de transmisores.

4.3 Conclusiones

Los resultados analizados a lo largo de este capítulo demuestran la eficacia de las técnicas basadas en trazado de rayos en su aplicación a la caracterización de la propagación, constituyendo una herramienta de apoyo a la caracterización de canales MIMO en interiores. Se han apreciado diferencias muy pequeñas entre las capacidades de canal obtenidas en las simulaciones y los valores obtenidos a partir de las medidas experimentales. Estas diferencias pueden tener como uno de sus orígenes la diferencia en el patrón de radiación de las antenas utilizadas en las medidas y los modelos aproximados utilizados en las simulaciones.

Las simulaciones ofrecen una capacidad del canal superior al caso experimental, aspecto que podría ser compensado si esta tendencia se mantuviese al analizar otro escenario del que se contase con medidas de referencia.

En cuanto al número de reflexiones a utilizar en las simulaciones, se ha demostrado que a partir de la tercera reflexión la aportación en los valores de la capacidad es mínima. Sería de interés comprobar el efecto que introduce el número de reflexiones en la caracterización de otros parámetros del canal. Para el análisis de capacidades sería recomendable no simular más allá de la tercera reflexión ya que el tiempo de simulación se incrementa significativamente para las reflexiones de orden superior.

Los dos escenarios analizados han presentado un comportamiento diferente que ha resultado de un gran interés de estudio. Para el salón de actos se ha observado un canal muy similar a uno tipo Rayleigh, mientras que en la sala multiusos no se han apreciado unas condiciones de propagación tan favorables, obteniendo capacidades más bajas en el análisis realizado.

Capítulo 5. Conclusiones y líneas futuras

5.1 Conclusiones

Este TFM tenía como objetivo demostrar el potencial del trazado de rayos para la caracterización de canales MIMO masivo en interiores. Se han presentado el estudio llevado a cabo en dos escenarios diferentes cuyo análisis, presentado en la primera sección del Capítulo 4, ha demostrado los buenos resultados obtenidos en las simulaciones realizadas para el cálculo de capacidades. La comparación de los resultados obtenidos en las simulaciones con aquellos resultantes de procesar una campaña de medidas previamente realizada por el grupo GISAR, ha permitido apreciar la precisión y utilidad de la herramienta CINDOOR utilizada en las simulaciones. En las simulaciones y en ese primer escenario canónico de referencia, la sistemática diferencia entre simulaciones y medidas puede deberse a la diferencia en los patrones de radiación de las antenas reales y los modelos utilizados en las simulaciones. En términos de capacidad de canal, puede afirmarse que los resultados obtenidos en las simulaciones han sido sistemáticamente superiores a los derivados de las medidas, por lo que de confirmarse esto en futuros estudios, se podría aplicar un factor de corrección para obtener una precisión más elevada.

Para la implantación de la quinta generación de comunicaciones móviles es fundamental la caracterización de canal radio en las diferentes bandas de frecuencias de interés. En base a los resultados obtenidos en este TFM, las herramientas de simulación como CINDOOR pueden contribuir notablemente a facilitar la caracterización del canal, evitando por otra parte costosas y complejas campañas de medidas.

En cuanto al análisis de la capacidad llevado a cabo en los dos escenarios propuestos, podemos afirmar que el salón de actos presenta un comportamiento muy similar a un canal radio tipo Rayleigh, lo que nos demuestra las buenas condiciones de propagación de este entorno. Los resultados de capacidad obtenidos en la sala multiusos no han sido tan buenos quedando sistemáticamente por debajo de los obtenidos en el salón de actos.

5.2 Líneas Futuras

Las líneas futuras que pueden establecerse para dar continuidad a este TFM podrían ir dirigidas a la caracterización del canal MIMO en bandas de frecuencias más elevadas, ya propuestas y contempladas para la implantación de la tecnología 5G en un futuro. Se debería contar con medidas sobre un escenario de referencia para su comparación con el resultado simulado, porque las conclusiones extraídas en la banda de 3 a 4 GHz objeto de este TFM no pueden ser extrapoladas a bandas, por poner un ejemplo, por encima de los 20 GHz. Sería necesario por tanto realizar nuevas campañas de medidas del canal radio, y eso pasa también por reacondicionar el sistema de medida utilizado.

Sería también interesante realizar un estudio más en profundidad del efecto que el orden de las reflexiones utilizado en la simulación tiene en otros parámetros del canal radio. Se ha observado que para la capacidad no es necesario considerar las contribuciones de los rayos reflejados más allá de la tercera reflexión, pero esto puede variar y afectar a otros parámetros.

Otra línea futura de investigación podría ser el desarrollo de modelos de antenas más precisas para su implementación en CINDOOR. Si se implementasen modelos cuyo patrón de radiación fuese idéntico al de la antena empleada para la campaña de medidas se podría realizar una comparación más precisa de los resultados medidos y simulados, pudiendo descartar el patrón de radiación de las antenas como fuente de imprecisión.

Referencias

- [1] A. Gupta and R. K. Jha, "A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies," in *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1206-1232, 2015, doi: 10.1109/ACCESS.2015.2461602.
- [2] Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2017–2022.
- [3] ITU towards "IMT for 2020 and beyond", disponible en octubre de 2020 en <https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-2020/Pages/default.aspx> .
- [4] IMT Vision – "Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond", ITU-R M.2083-0 (09/2015), disponible en octubre de 2020 en <https://www.itu.int/rec/R-REC-M.2083-0-201509-I/es> .
- [5] J. R. Perez, R. P. Torres, M. Domingo, L. Valle and J. Basterrechea, "Analysis of Massive MIMO Performance in an Indoor Picocell With High Number of Users," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 107025-107034, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3000602.
- [6] J. R. Pérez et al., "Empirical Characterization of the Indoor Radio Channel for Array Antenna Systems in the 3 to 4 GHz Frequency Band," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 94725-94736, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2928421.
- [7] Y. Wang, J. Li, L. Huang, Y. Jing, A. Georgakopoulos and P. Demestichas, "5G Mobile: Spectrum Broadening to Higher-Frequency Bands to Support High Data Rates," in *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 9, no. 3, pp. 39-46, Sept. 2014, doi: 10.1109/MVT.2014.2333694.
- [8] Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital, "Plan Nacional 5G 2018-2020".
- [9] Ministerio de Economía y Empresa, "Nota Informativa resultados Subasta espectro 3600 - 3800 MHz".
- [10] T. L. Marzetta, "Massive MIMO: An Introduction," in *Bell Labs Technical Journal*, vol. 20, pp. 11-22, 2015, doi: 10.15325/BLTJ.2015.2407793.
- [11] Cisco, "802.11ac: The Fifth Generation of Wi-Fi", Technical White Paper", August, 2012.
- [12] F. Rusek et al., "Scaling Up MIMO: Opportunities and Challenges with Very Large Arrays," in *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 30, no. 1, pp. 40-60, Jan. 2013, doi: 10.1109/MSP.2011.2178495.
- [13] E. Björnson, J. Hoydis, and Luca Sanguinetti. 2017. "Massive MIMO Networks: Spectral, Energy, and Hardware Efficiency" *Found. Trends Signal Process.* 11, 3–4 (15 11 2017), pp. 154–655, doi: 10.1561/20000000093.

- [14] R. P. Torres et al., “Empirical characterisation of the indoor multi-user MIMO channel in the 3.5 GHz band,” in *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 13, no. 13, pp. 2386-2390, Oct. 2019, doi: 10.1049/iet-map.2018.6215.
- [15] R. P. Torres, L. Valle, M. Domingo, S. Loredó and M. C. Díez, “CINDOOR: an engineering tool for planning and design of wireless systems in enclosed spaces,” in *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 41, no. 4, pp. 11-22, Aug. 1999, doi: 10.1109/74.789733.
- [16] O. Fernández, L. Valle, M. Domingo, R.P. Torres, “Flexible Rays,” in *IEEE Vehicular Technology Magazine*., vol. 1, no. 3, pp. 18 – 27, March 2008, doi: 10.1109/MVT.2008.919412.
- [17] S. Loredó, A. Rodríguez-Alonso and R. P. Torres, “Indoor MIMO Channel Modeling by Rigorous GO/UTD-Based Ray Tracing,” in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 57, no. 2, pp. 680-692, March 2008, doi: 10.1109/TVT.2007.906362.
- [18] “Effects of building materials and structures on radiowave propagation above about 100 MHz”, ITU-R P.2040-1 (07/2015), disponible en octubre de 2020 en <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.2040-1-201507-I/en> .

Anexos

Anexo 1. Código para calcular la CDF de la capacidad de canal

```
function CapacidadCDF_CINDOOR(rotulo,SNRi,normaliza_tipo)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Esta rutina calcula y representa la CDF de la capacidad del canal para el
%número de usuarios/Tx seleccionado por el usuario. Se incluye en la
%representación, el resultado para el caso de canales Rayleigh.
%ÚLTIMA MODIFICACIÓN: 21/09/2020

%Argumentos:
    %rotulo: Identificación a añadir al gráfico
    %SNRi: Valor en dB de la SNR de referencia para el estudio
    %normaliza_tipo: tipo de normalización 1-Usuario (típico), 2-Global
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

global ficherosCin %Ficheros con los datos de usuarios a procesar

%SNR en lineal
snr=10.^(SNRi/10);

%Cargar datos de los Transmisores/MS
Nt=size(ficherosCin,1);

h=[];

for n=1:Nt
    a=load(ficherosCin(n));
    vari=fieldnames(a);
    aux_v=getfield(a,vari{1}); %Volcar del *.mat a variable

    if (n==1)
        Nr=size(aux_v,1); %Tamaño del mallado
        Nf=size(aux_v,3); %Tonos de frecuencia
    end

    h(:,n,:)=aux_v;

end

%Normalizar matriz de canal Tx a Tx
if (normaliza_tipo==1)
    for n=1:Nt
        H1(:,:)=h(:,n,:); %Me quedo con matriz de NrxNf para el Tx n-ésimo

        aux=sqrt(sum(sum(H1.*conj(H1)))/(Nf*Nr));
```

```

        h(:,n,:)=h(:,n,:)/aux; %Aplico la normalización
    end
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Normalización inicial
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Concatenación de canales
NH=[];
for f=1:Nf
    H(:,:)=h(:,:,f);          %Me quedo con matriz de NrxNt para la frec. f
    NH=[NH; sum(sum(H.*conj(H)))/(Nt*Nr)]; %Normas de cada vector de canales
end
NH=sqrt(mean(NH));          %Esperanza de las normas

%Bucle frecuencial para encontrar los autovalores de H normalizada y Capac.
for f=1:Nf
    H(:,:)=h(:,:,f);          %Me quedo con matriz de NrxNt para la frec. f

    %Aplicar normalización para el caso global
    if (normaliza_tipo==2)
        H=H/NH;
    end

    %Cálculo de los autovalores
    D = (svd(H)).^2;
    D1(f,:)=D.';

    %Capacidad
    C(f)=sum(log2(1+snr/Nt*abs(D1(f,:))))); %Le multiplico por el autovalor a
frecuencia j1, canal j (SNR/N)*Eigval(frec,CH)
end

%Representación gráfica de la CDF de la capacidad
figure(1)
hc=cdfplot(C)
hold on

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%CANAL RAYLEIGH: INCLUIR EN LA COMPARATIVA%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Generar tantos canales como usuarios/tx activos se hayan seleccionado
%Resultado: matriz h de NrxNfxNt
h=[];
for m=1:Nt
    x1=random('Normal',0,1,Nr,Nf); %Parte Real
    x2=random('Normal',0,1,Nr,Nf); %Parte imaginaria
    h(:,:,m)=x1+x2*i;          %Canal i-ésimo
end

%Normalizar matriz de canal Tx a Tx

```

```

if (normaliza_tipo==1)
    for n=1:Nt
        H1(:, :)=h(:, :, n);    %Me quedo con matriz de Nr x Nf para el Tx n-ésimo

        aux=sqrt(sum(sum(H1.*conj(H1)))/(Nf*Nr));
        h(:, :, n)=h(:, :, n)/aux; %Aplico la normalización
    end
end

%Concatenación de canales
NH=[];
for f=1:Nf
    H(:, :)=h(:, f, :);    %Me quedo con matriz de Nr x Nt para la frec. f
    NH=[NH; sum(sum(H.*conj(H)))/(Nt*Nr)];
end

NH=sqrt(mean(NH));

%Bucle frecuencial para encontrar los autovalores de H normalizada
for f=1:Nf
    H(:, :)=h(:, f, :);    %Me quedo con matriz de Nr x Nt para la frec. f

    %Aplicar normalización para el caso global
    if (normaliza_tipo==2)
        H=H/NH;
    end

    %Cálculo de los autovalores
    D = (svd(H)).^2;
    D1(f, :)=D.';

    %Capacidad
    C(f)=sum(log2(1+snr/(Nt)*D1(f, :)));
end

%Salida gráfica
hc=cdfplot(C)
legend('CINDOOR', 'i.i.d. Rayleigh');
title(['CDF of capacity: ' num2str(rotulo) ', SNR=' num2str(SNRi) ' dB' ]);
ylabel('CDF')
xlabel('Mean capacity (bit/s/Hz)')

```

Anexo 2. Código para calcular y representar la capacidad en función de la SNR

```
function CapacidadSNR_CINDOOR(rotulo,normaliza_tipo)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Esta rutina calcula y representa la capacidad del canal para el
%número de usuarios/Tx seleccionado por el usuario y con un barrido de la
%SNR entre -10 y 20 dB. Se incluye en la representación, el resultado para
%el caso de canales Rayleigh.
%ÚLTIMA MODIFICACIÓN: 21/09/2020

%Argumentos:
%rotulo: Identificación a añadir al gráfico
%normaliza_tipo: tipo de normalización 1-Usuario (típico), 2-Global
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

global ficherosCin %Ficheros con los datos de usuarios a procesar

%Cargar datos de los Transmisores/MS
Nt=size(ficherosCin,1);

h=[];
for n=1:Nt
    a=load(ficherosCin(n));
    vari=fieldnames(a);
    aux_v=getfield(a,vari{1}); %Volcar del *.mat a variable

    if (n==1)
        Nr=size(aux_v,1); %Tamaño del mallado
        Nf=size(aux_v,3); %Tonos de frecuencia
    end

    h(:,n,:)=aux_v;

end

%Normalizar matriz de canal Tx a Tx
if (normaliza_tipo==1)
    for n=1:Nt
        H1(:,:)=h(:,n,:); %Me quedo con matriz de NrxNf para el Tx n-ésimo

        aux=sqrt(sum(sum(H1.*conj(H1)))/(Nf*Nr));
        h(:,n,:)=h(:,n,:)/aux; %Aplico la normalización
    end
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Normalización inicial
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```

%Concatenación de canales
NH=[];
for f=1:Nf
    H(:, :)=h(:, :, f);          %Me quedo con matriz de NrxNt para la frec. f
    NH=[NH; sum(sum(H.*conj(H)))/(Nt*Nr)]; %Normas de cada vector de canales
end
NH=sqrt(mean(NH));              %Esperanza de las normas

%Bucle frecuencial para encontrar los autovalores de H normalizada y Capac.
for f=1:Nf
    H(:, :)=h(:, :, f);          %Me quedo con matriz de NrxNt para la frec. f

    %Aplicar normalización para el caso global
    if (normaliza_tipo==2)
        H=H/NH;
    end

    %Cálculo de los autovalores
    D = (svd(H)).^2;
    D1(f, :)=D.';
end

%Rango de valores de la SNR: fijado por el usuario aquí
SNR=linspace(-10,20,64);
snr=10.^(SNR/10);

%Cálculo de capacidad
for n=1:size(SNR,2) %Capacidad para bucle en SNR
    for f=1:Nf
        C(n, f)=sum(log2(1+snr(n)/Nt*abs(D1(f, :))));
    end
end

C1=mean(C,2);

%Representación gráfica de la CDF de la capacidad
figure(1)
plot(SNR,C1)
hold on

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%CANAL RAYLEIGH: INCLUIR EN LA COMPARATIVA%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Generar tantos canales como usuarios/tx activos se hayan seleccionado

%Resultado: matriz h de NrxNfxNt
h=[];
for m=1:Nt
    x1=random('Normal',0,1,Nr,Nf); %Parte Real
    x2=random('Normal',0,1,Nr,Nf); %Parte imaginaria
    h(:, :, m)=x1+x2*i;           %Canal i-ésimo
end

```

```

%Concatenación de canales
NH=[];
for f=1:Nf
    H(:, :)=h(:, f, :);           %Me quedo con matriz de NrxNt para la frec. f
    NH=[NH; sum(sum(H.*conj(H)))/(Nt*Nr)];
end

NH=sqrt(mean(NH));

%Bucle frecuencial para encontrar los autovalores de H normalizada
for f=1:Nf
    H(:, :)=h(:, f, :);           %Me quedo con matriz de NrxNt para la frec. f
    H=H/NH;

    %Cálculo de los autovalores
    D = (svd(H)).^2;
    D1(f, :)=D.';
end

%Cálculo de capacidad
for n=1:size(SNR,2) %Capacidad para bucle en SNR
    for f=1:Nf
        C(n, f)=sum(log2(1+snr(n)/Nt*abs(D1(f, :))));
    end
end

C1=mean(C,2);

%Salida gráfica
plot(SNR,C1)
legend('CINDOOR', 'i.i.d. Rayleigh');
title(['Capacity as a function of SNR, ' num2str(rotulo)]);
xlabel('SNR (dB)')
ylabel('Mean capacity (bit/s/Hz)')

```