



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

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

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de
Telecomunicación

Análisis de la selectividad del canal radio en milimétricas
en un escenario dispersivo de interiores

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de
Telecomunicación

AUTOR/A: Cabello Luna, Daniel

Tutor/a: Rubio Arjona, Lorenzo

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

Agradecimientos

Quiero dedicar unas palabras a todos aquellos que han estado a mi lado durante estos años y que han hecho posible que llegue hasta aquí. En especial a mis padres, a mi hermano y a mi novia por todo el esfuerzo que han depositado en mí para que pueda alcanzar todas mis metas. También a mis amigos, por brindarme todo su apoyo. Finalmente, agradecer al director de mi Trabajo Fin de Grado, Lorenzo Rubio Arjona, por guiarme y ayudarme durante todo este tiempo.

Gracias.

Resumen

En este Trabajo Fin de Grado (TFG) se ha realizado un análisis de la dispersión temporal del canal radio mediante el estudio del perfil del retardo de potencia (PDP, *Power Delay Profile*) y del *Delay Spread*. También se ha llevado a cabo el análisis del parámetro K de la Función Densidad de Probabilidad (FDP) *Rice*. Ambos estudios se han realizado de cara a conocer su comportamiento tanto en distancia como en ancho de banda. Además, se ha caracterizado para las bandas de milimétricas de 26 GHz, 28 GHz, 33 GHz y 38 GHz. Todas estas bandas pertenecen a las aceptadas por el Sector de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU-R, *Radiocommunication Sector of the International Telecommunication Union*) para el despliegue de sistemas 5G.

Resum

En aquest Treball Fi de Grau (TFG) s'ha realitzat una anàlisi de la dispersió temporal del canal radio mitjançant l'estudi del perfil de retard de potencia (PDP, *Power Delay Profile*) i del *Delay Spread*. També s'ha dut a terme l'anàlisi del paràmetre K de la Funció Densitat de Probabilitat (FDP) *Rice*. Tots dos estudis s'han realitzat de cara a conèixer el seu comportament tant en distància com en amplada de banda. A més, s'ha caracteritzat per a les bandes de mil·limètriques de 26 GHz, 28 GHz, 33 GHz i 38 GHz. Totes aquestes bandes pertanyen a les acceptades pel Sector de Radiocomunicacions de la Unió Internacional de Telecomunicacions (ITU-R, *Radiocommunication Sector of the International Telecommunication Union*) per al desplegament de sistemes 5G.

Abstract

An analysis of the temporal dispersion of the radio channel has been carried out through the study of the *Power Delay Profile* (PDP) and the *Delay Spread* in this Final Degree Project. The analysis of the K parameter of the Rice Probability Density Function has also been carried out. Both studies have been carried out in order to know its behavior both in distance and in bandwidth. In addition, it has been characterized for the millimeter bands of 26 GHz, 28 GHz, 33 GHz and 38 GHz. All these bands belong to those accepted by the Radiocommunication Sector of the International Telecommunication Union (ITU-R) for the deployment of 5G.

Índice

Capítulo 1	Introducción y objetivo	1
1.1.	Introducción	1
1.2.	Objetivo.....	1
1.3.	Organización de la memoria	2
Capítulo 2	Metodología	3
2.1.	Gestión del proyecto.....	3
2.2.	Distribución de tareas.....	3
2.3.	Diagrama temporal.....	4
Capítulo 3	Aspectos Teóricos	5
3.1.	Respuesta del canal	5
3.2.	Power Delay Profile	7
3.3.	Delay Spread	9
3.4.	Función densidad de probabilidad <i>Rice</i>	10
3.4.1.	Parámetro K.....	10
Capítulo 4	Campaña de medidas.....	11
4.1.	Introducción	11
4.2.	Entorno de propagación	11
4.3.	Configuración de las medidas	12
Capítulo 5	Resultados	17
5.1.	Introducción	17
5.2.	Delay Spread	17
5.2.1.	Delay Spread en función de la distancia	17
5.2.2.	<i>Delay Spread</i> en función del ancho de banda	26
5.2.3.	<i>Delay Spread</i> en función del <i>Threshold</i>	27
5.3.	Parámetro K	28
5.3.1.	Parámetro K en función de la distancia.....	28
5.3.2.	Parámetro K en función del ancho de banda.....	34

5.4.	Parámetro K y <i>Delay Spread</i>	35
5.4.1.	Parámetro K y <i>Delay Spread</i> en función de la distancia.....	35
5.4.2.	Parámetro K y <i>Delay Spread</i> en función del ancho de banda	38
Capítulo 6	Conclusiones y líneas futuras	41
6.1.	Conclusiones	41
6.2.	Líneas futuras	42
Capítulo 7	Referencias	43

Índice de Figuras

Figura 3.1.	Propagación multicamino en un entorno radio. Fuente: elaboración propia.	5
Figura 3.2.	Implementación del modelado del canal. Fuente: elaboración propia.	6
Figura 3.3.	Evolución de las componentes que establecen el canal. Fuente: elaboración propia.	7
Figura 3.4.	PDP en la posición 4-3. Fuente: elaboración propia.	8
Figura 3.5.	PDP en la posición 5-1. Fuente: elaboración propia.	8
Figura 3.6.	<i>Delay Spread</i> y retardo medio en PDP. Fuente: elaboración propia.	9
Figura 4.1.	Sala de medidas. Fuente: Cristina Catalá, TFM, [13].	12
Figura 4.2.	Esquemático de la sonda de medición. Fuente: Raúl Cervera, TFG, [14].	13
Figura 4.3.	Sonda y antena en Rx. Vista anterior. Fuente: Cristina Catalá, TFM, [13].	13
Figura 4.4.	Esquema en planta de la distribución de las antenas en la sala de medidas. Fuente: Cristina Catalá, TFM, [13].	14
Figura 4.5.	Sistema transmisor en la posición 1.2. Fuente: Cristina Catalá, TFM, [13].	15
Figura 5.1.	<i>Delay Spread</i> en función de la distancia. 26 GHz. Fuente: elaboración propia. .	19
Figura 5.2.	<i>Delay Spread</i> en función de la distancia. 28 GHz. Fuente: elaboración propia. .	19
Figura 5.3.	<i>Delay Spread</i> en función de la distancia. 33 GHz. Fuente: elaboración propia. .	20
Figura 5.4.	<i>Delay Spread</i> en función de la distancia. 38 GHz. Fuente: elaboración propia. .	20
Figura 5.5.	<i>Delay Spread</i> medio en función de la distancia. 26 GHz. Fuente: elaboración propia.	21
Figura 5.6.	<i>Delay Spread</i> medio en función de la distancia. 28 GHz. Fuente: elaboración propia.	21
Figura 5.7.	<i>Delay Spread</i> medio en función de la distancia. 33 GHz. Fuente: elaboración propia.	21

Figura 5.8.	<i>Delay Spread</i> medio en función de la distancia. 38 GHz. Fuente: elaboración propia.....	21
Figura 5.9.	<i>Delay Spread</i> medio a 26 GHz en función de la distancia. BW = 3 GHz. Fuente: elaboración propia.	22
Figura 5.10.	<i>Delay Spread</i> medio a 28 GHz en función de la distancia. BW = 3 GHz. Fuente: elaboración propia.	22
Figura 5.11.	<i>Delay Spread</i> medio a 33 GHz en función de la distancia. BW = 3 GHz. Fuente: elaboración propia.	22
Figura 5.12.	<i>Delay Spread</i> medio a 38 GHz en función de la distancia. BW = 3 GHz. Fuente: elaboración propia.	22
Figura 5.13.	<i>Delay Spread</i> medio a 26 GHz en función de la distancia. BW = 4 GHz. Fuente: elaboración propia.	23
Figura 5.14.	<i>Delay Spread</i> medio a 28 GHz en función de la distancia. BW = 4 GHz. Fuente: elaboración propia.	23
Figura 5.15.	<i>Delay Spread</i> medio a 33 GHz en función de la distancia. BW = 4 GHz. Fuente: elaboración propia.	23
Figura 5.16.	<i>Delay Spread</i> medio a 38 GHz en función de la distancia. BW = 4 GHz. Fuente: elaboración propia.	23
Figura 5.17.	<i>Delay Spread</i> en función de la distancia. BW = 16 GHz. Fuente: elaboración propia.....	25
Figura 5.18.	<i>Delay Spread</i> en función de la distancia. BW = 16 GHz. Fuente: elaboración propia.....	25
Figura 5.19.	<i>Delay Spread</i> por ancho de banda en frecuencia. Fuente: elaboración propia.	26
Figura 5.20.	<i>Delay Spread</i> en función del TH. Fuente: elaboración propia.	27
Figura 5.21.	Parámetro K a 26 GHz en función de la distancia. BW = 2 GHz. Fuente: elaboración propia.	28
Figura 5.22.	Parámetro K a 28 GHz en función de la distancia. BW = 2 GHz. Fuente: elaboración propia.	29
Figura 5.23.	Parámetro K a 33 GHz en función de la distancia. BW = 2 GHz. Fuente: elaboración propia.	29
Figura 5.24.	Parámetro K a 38 GHz en función de la distancia. BW = 2 GHz. Fuente: elaboración propia.	30

Figura 5.25.	Parámetro K medio a 26 GHz en función de la distancia. BW = 2 GHz. Fuente: elaboración propia.	30
Figura 5.26.	Parámetro K medio a 28 GHz en función de la distancia. BW = 2 GHz. Fuente: elaboración propia.	30
Figura 5.27.	Parámetro K medio a 33 GHz en función de la distancia. BW = 2 GHz. Fuente: elaboración propia.	31
Figura 5.28.	Parámetro K medio a 38 GHz en función de la distancia. BW = 2 GHz. Fuente: elaboración propia.	31
Figura 5.29.	Parámetro K medio a 26 GHz en función de la distancia. BW = 3 GHz. Fuente: elaboración propia.	32
Figura 5.30.	Parámetro K medio a 28 GHz en función de la distancia. BW = 3 GHz. Fuente: elaboración propia.	32
Figura 5.31.	Parámetro K medio a 33 GHz en función de la distancia. BW = 3 GHz. Fuente: elaboración propia.	32
Figura 5.32.	Parámetro K medio a 38 GHz en función de la distancia. BW = 3 GHz. Fuente: elaboración propia.	32
Figura 5.33.	Parámetro K medio a 26 GHz en función de la distancia. BW = 4 GHz. Fuente: elaboración propia.	32
Figura 5.34.	Parámetro K medio a 28 GHz en función de la distancia. BW = 4 GHz. Fuente: elaboración propia.	32
Figura 5.35.	Parámetro K medio a 33 GHz en función de la distancia. BW = 4 GHz. Fuente: elaboración propia.	33
Figura 5.36.	Parámetro K medio a 38 GHz en función de la distancia. BW = 4 GHz. Fuente: elaboración propia.	33
Figura 5.37.	Parámetro K en función de la distancia. BW = 16 GHz. Fuente: elaboración propia.	33
Figura 5.38.	Parámetro K en función del ancho de banda. Fuente: elaboración propia.	34
Figura 5.39.	Parámetro K y <i>Delay Spread</i> a 26 GHz en función de la distancia. BW = 2 GHz. Fuente: elaboración propia.	35
Figura 5.40.	Parámetro K y <i>Delay Spread</i> a 28 GHz en función de la distancia. BW = 2 GHz. Fuente: elaboración propia.	35

Figura 5.41.	Parámetro K y <i>Delay Spread</i> a 33 GHz en función de la distancia. BW = 2 GHz. Fuente: elaboración propia.	36
Figura 5.42.	Parámetro K y <i>Delay Spread</i> a 38 GHz en función de la distancia. BW = 2 GHz. Fuente: elaboración propia.	36
Figura 5.43.	Parámetro K y <i>Delay Spread</i> a 26 GHz en función de la distancia. BW = 3 GHz. Fuente: elaboración propia.	36
Figura 5.44.	Parámetro K y <i>Delay Spread</i> a 28 GHz en función de la distancia. BW = 3 GHz. Fuente: elaboración propia.	36
Figura 5.45.	Parámetro K y <i>Delay Spread</i> a 33 GHz en función de la distancia. BW = 3 GHz. Fuente: elaboración propia.	36
Figura 5.46.	Parámetro K y <i>Delay Spread</i> a 38 GHz en función de la distancia. BW = 3 GHz. Fuente: elaboración propia.	36
Figura 5.47.	Parámetro K y <i>Delay Spread</i> a 26 GHz en función de la distancia. BW = 4 GHz. Fuente: elaboración propia.	37
Figura 5.48.	Parámetro K y <i>Delay Spread</i> a 28 GHz en función de la distancia. BW = 4 GHz. Fuente: elaboración propia.	37
Figura 5.49.	Parámetro K y <i>Delay Spread</i> a 33 GHz en función de la distancia. BW = 4 GHz. Fuente: elaboración propia.	37
Figura 5.50.	Parámetro K y <i>Delay Spread</i> a 38 GHz en función de la distancia. BW = 4 GHz. Fuente: elaboración propia.	37
Figura 5.51.	<i>Delay Spread</i> en función de Parámetro K. Fuente: Elaboración propia.	38
Figura 5.52.	Parámetro K en función del ancho de banda. Fuente: Elaboración propia.	38
Figura 5.53.	<i>Delay Spread</i> en función del ancho de banda. Fuente: Elaboración propia.	38
Figura 5.54.	<i>Delay Spread</i> y Parámetro K en función del ancho de banda. Fuente: elaboración propia.	38

Índice de Tablas

Tabla 2.1	Diagrama temporal de distribución de tareas. Fuente: elaboración propia.	4
Tabla 5.1	Distancia entre transmisor y receptor. Fuente: elaboración propia.	18
Tabla 5.2	Frecuencias estudiadas. Fuente: elaboración propia.	18
Tabla 5.3	Frecuencias estudiadas. Ancho de banda de 3 GHz. Fuente: elaboración propia.	21
Tabla 5.4	Frecuencias estudiadas. Ancho de banda de 4 GHz. Fuente: elaboración propia.	22
Tabla 5.5	Valores <i>Delay Spread</i> para 26 GHz según ancho de banda. Fuente: elaboración propia.....	23
Tabla 5.6	Valores <i>Delay Spread</i> para 28 GHz según ancho de banda. Fuente: elaboración propia.....	24
Tabla 5.7	Valores <i>Delay Spread</i> para 33 GHz según ancho de banda. Fuente: elaboración propia.....	24
Tabla 5.8	Valores <i>Delay Spread</i> para 38 GHz según ancho de banda. Fuente: elaboración propia.....	24
Tabla 5.9	Frecuencias empleadas para cálculo de <i>Delay Spread</i> . Fuente: elaboración propia.	26
Tabla 5.10	Medidas de Parámetro K y <i>Delay Spread</i> en función del ancho de banda. Fuente: elaboración propia.	39

Listado de Acrónimos

5G	Quinta generación de sistemas de comunicaciones móviles
APL	<i>Antennas & Propagation Lab</i>
BW	<i>Bandwidth</i>
CPI	Ciudad Politécnica de la Innovación
EHF	<i>Extremely High Frequency</i>
ITEAM	Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia
ITU-R	Sector de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
PDP	<i>Power Delay Profile</i>
FDP	Función Densidad de Probabilidad
SHF	<i>Super High Frequency</i>
TFG	Trabajo Fin de Grado
TFM	Trabajo Fin de Máster
TH	<i>Threshold</i>
ULA	<i>Uniform Linear Array</i>
UPV	Universitat Politècnica de València
URA	<i>Uniform Rectangular Array</i>
VNA	<i>Vector Network Analyzer</i>

Capítulo 1 Introducción y objetivo

1.1. Introducción

En la actualidad cada vez existe un mayor número de dispositivos conectados que emplean el canal radio como medio de comunicación. Este incremento puede provocar la saturación de las actuales infraestructuras de comunicaciones, provocando la necesidad de mejorar su capacidad y desarrollar nuevos sistemas de comunicación vía radio. Dentro de este marco teórico, se busca poder mejorar diferentes parámetros, como la latencia, la velocidad de conexión o la capacidad de los sistemas actuales. Para lograr abordar todas estas mejoras y poder cumplir con los nuevos estándares que se proponen, se ha autorizado el uso de nuevas bandas de comunicación, que son 24.25 GHz a 27.5 GHz, 31.8 GHz a 33.4 GHz y 37 a 40.5 GHz, abarcando así tanto parte de la banda *Super High Frequency* (SHF) y la banda de milimétricas o *Extremely High Frequency* (EHF) [1], [2].

Debido a las condiciones habituales en las que pueden encontrarse comunicaciones vía radio, cabe destacar que existen una serie de elementos (*scatterers*) que interactúan con las señales que se transmiten, ya sea mediante reflexión, difracción o dispersión, modificando su amplitud, fase, retardo y dirección respecto a la componente principal que se transmite directamente al receptor [3], [4].

1.2. Objetivo

El objetivo de este TFG es analizar el comportamiento selectivo del canal en la banda de milimétricas, concretamente de 24 GHz a 40 GHz. El análisis llevado a cabo se centra en las principales bandas definidas por la ITU-R de cara al despliegue de sistemas 5G, como son los 26 GHz, 28 GHz, 33 GHz y 38 GHz. Se busca comprender el comportamiento de la señal en un entorno interior muy dispersivo, como es un laboratorio, el cual está lleno de elementos que producen reflexiones en la propagación de la señal, produciendo lo que conocemos como propagación multicamino [2].

Cabe destacar que no es considerado ningún tipo de desplazamiento en las antenas emisoras puesto que todas ellas se encuentran completamente estáticas a la hora de realizar las medidas. Con respecto a la antena receptora, durante las medidas también permanece estática, no obstante hay que tener en cuenta el desplazamiento que realiza sobre el array que la contiene. Se realiza una medida diferente para cada una de las posiciones que ocupa la antena transmisora.

Todas estas medidas son procesadas a través de diferentes scripts en *Matrix Laboratory* (MATLAB), los cuales permiten la obtención de diferentes resultados que ayudan a elaborar las conclusiones.

1.3. Organización de la memoria

La distribución de la memoria de este TFG se ha llevado a cabo siguiendo la siguiente estructura:

- Capítulo 2. En este capítulo se define el cronograma temporal seguido a lo largo de la realización del proyecto y, además, se redactan las diferentes tareas empleadas.
- Capítulo 3. En el capítulo 3 se redactan los aspectos teóricos de la caracterización del canal, explicando diferentes parámetros como son el perfil de retardo de potencia o PDP, el *Delay Spread* o parámetro *K*.
- Capítulo 4. Este capítulo incluye una descripción detallada de la campaña de medidas, realizada en un laboratorio en la banda de 24 a 40 GHz, para la obtención de los datos de estudio.
- Capítulo 5. En este capítulo se organizan los resultados obtenidos una vez analizados los datos de la campaña de medidas.
- Capítulo 6. En el Capítulo 6 se recogen las principales conclusiones derivadas del trabajo realizado y se proponen las líneas de trabajo futuro como continuación de este TFG.

Capítulo 2 Metodología

2.1. Gestión del proyecto

El desarrollo de este TFG se ha dividido en 3 partes. En primera instancia, se realizaron una serie de estudios de prueba sobre muestras más pequeñas de datos que ayudarían a la comprensión de las matrices de datos MATLAB sobre las que se basa este TFG.

La segunda parte se dedicó a la comprensión y reestructuración de las matrices definitivas, para poder emplearlas de forma adecuada en MATLAB. En este punto también se realizó una búsqueda bibliográfica acerca del PDP, *Delay Spread* y la FDP *Rice*.

La tercera parte, una vez reestructuradas las matrices definitivas, se empleó para el análisis y estudio de las medidas. Así mismo, se llevó a cabo la creación de las figuras que componen el Capítulo 5. Finalmente, se analizaron los resultados obtenidos, comparándolos con la información teórica, con el objetivo de desarrollar las conclusiones que se reflejan en el Capítulo 6.

2.2. Distribución de tareas

El desarrollo de este TFG se ha hecho siguiendo las pautas que definen estas tareas:

- T1. Búsqueda de artículos bibliográficos y análisis de los mismos.
- T2. Estudio de aspectos teóricos del canal radio y de los parámetros que caracterizan el canal.
- T3. Desarrollo de análisis de prueba para comprender la campaña de medidas.
- T4. Creación de funciones en el entorno de desarrollo MATLAB, puesto que las medidas definitivas se proporcionaban en matrices de dicho entorno:
 - Procesado de las medidas en función de los parámetros del canal radio que se desee analizar.
 - Obtención de gráficos y resultados numéricos para los distintos campos de estudio que se tienen en consideración.
- T5. Conclusiones y líneas futuras basadas en los resultados obtenidos.
- T6. Redacción final de la memoria.

2.3. Diagrama temporal

Las tareas que han sido previamente mencionadas han sido distribuidas de la siguiente manera. Cabe destacar que, debido a la realización de prácticas en empresa y posterior introducción en el mercado laboral, la realización de este TFG no ha podido ser a tiempo completo, extendiéndose, por ello, más en el tiempo.

Tarea	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre
1	X X								
2	X	X							
3		X X							
4			X	X	X X X	X X X	X	X X X	X X
5									
6								X	X X

Tarea	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio
1									
2									
3									
4									
5			X	X		X	X	X X X	X
6	X	X			X	X	X X	X X	X X

Tabla 2.1 Diagrama temporal de distribución de tareas. Fuente: elaboración propia.

Capítulo 3 Aspectos Teóricos

3.1. Respuesta del canal

En cualquier sistema de comunicaciones, podemos disponer de un determinado control sobre los diferentes elementos que lo forman. De todos estos, el único sobre el que no se dispone de control, es el canal de comunicación. Este es el elemento más susceptible de sufrir problemas y supone una limitación de cara a todo tipo de comunicación que se desee realizar, ya sea vía radio o mediante algún tipo de elemento físico, como podría ser un cable o fibra óptica. Esto lleva a gran cantidad de investigadores a estudiar el comportamiento del mismo para, de una manera lo más correcta posible, poder estimar las condiciones que se tendrán y actuar en consecuencia a ello [5].

En lo que respecta a este estudio, un canal radio dispone de una serie de elementos que interaccionan con el campo transmitido. Sumado a esto, es destacable el hecho de que una antena no es capaz de emitir únicamente en una sola dirección, puesto que ningún diagrama de radiación abarca una sola dirección. Esto provoca que, pese a que a la antena receptora puede llegar una componente directa de la señal transmitida, también existe la probabilidad de que esta sea alcanzada por otros rayos que difieren del de la componente directa y que también tienen diferentes retardos. Esto produce lo que conocemos como la propagación multicamino de la señal [2].

En la Figura 3.1, se puede visualizar un esquema que pretende dar a entender el fenómeno que se está comentando.

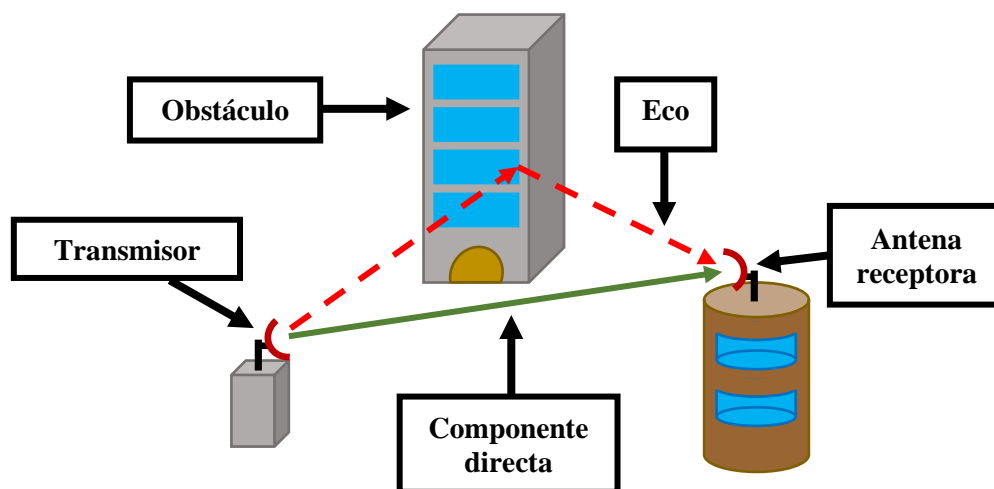


Figura 3.1. Propagación multicamino en un entorno radio. Fuente: elaboración propia.

La propagación multicamino puede ser causada por reflexiones, difracciones o dispersión en el entorno de propagación. Cuando una señal alcanza un obstáculo, esta se refleja en el mismo y parte de su energía puede llegar al receptor en un tiempo posterior al que lo haría la señal directa emitida desde el transmisor [3].

Además, estas reflexiones pueden comportarse de manera constructiva o destructiva con la señal directa, provocando así posibles atenuaciones en la señal que llega al receptor. Esto puede provocar, además, pérdida de datos en la información que ha sido transmitida [6].

En cuanto a la difracción, podemos destacar que no tendrá un papel fundamental en este análisis, puesto que todos nuestros receptores, independientemente de su disposición, disponen de visión directa con el emisor. En todo caso, sería una de las explicaciones que se le podría dar al porqué la señal puede alcanzar diferentes puntos pese a no tener una línea de visión directa respecto a ellos. Gracias a las medidas realizadas se puede obtener una estimación del comportamiento que ha tenido el canal ante los pulsos de señal emitidos entre emisor y receptor.

Respecto al canal que estamos tratando, podemos asegurar que su respuesta impulsional será esencial de cara al estudio de la caracterización temporal del mismo, ya que afectará en cómo serán el resto de los parámetros que se definirán a continuación. Esta puede ser modelada teniendo en cuenta la gran cantidad de caminos que nos encontraremos en el canal, por lo que puede ser definido como la suma de diferentes ramas con distintos retardos, teniendo cada una atenuaciones y desfases diferentes. Una referencia a lo comentado puede ser observada en la Figura 3.2. En ella se muestra cómo el modelado del canal está definido por diferentes ramas separadas temporalmente $\Delta\tau$. Con esto, se puede definir la respuesta impulsional del canal $h(t, \tau)$ como un filtro FIR [7].

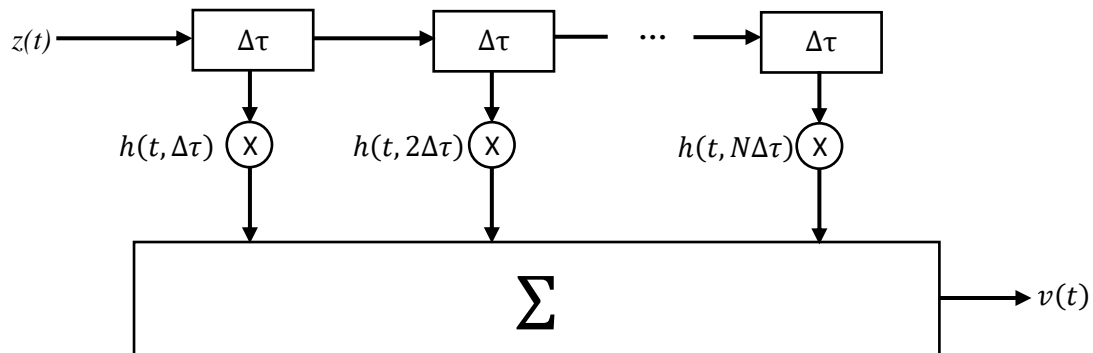


Figura 3.2. Implementación del modelado del canal. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 3.3 se representa el comportamiento que ha sido comentado de una forma más visual o gráfica. A medida que la componente temporal va aumentando, cada una de las componentes que forman el canal varía en amplitud. Algo similar ocurre con la componente de retardo, donde a medida que esta varía, sus componentes también modifican su amplitud [8].

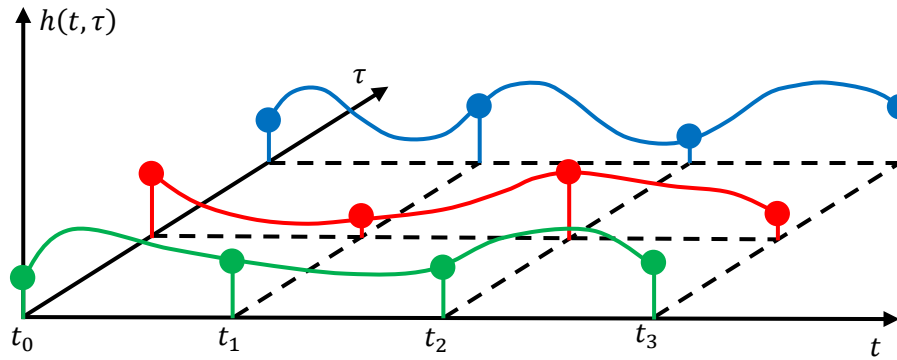


Figura 3.3. Evolución de las componentes que establecen el canal. Fuente: elaboración propia.

En concreto, las medidas realizadas aportaron datos acerca de la función de transferencia cronovariante, por lo que esta respuesta del canal viene caracterizada por la siguiente función, que es la transformada de Fourier de la función de ensanchamiento respecto a la variable de retardo τ [9]:

$$T(f, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t, \tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau, \quad (1)$$

pudiendo, además, expresar $h(t, \tau)$ como [9]:

$$h(t, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} T(f, t) e^{j2\pi f\tau} df. \quad (2)$$

Se debe de indicar que se asumirá que el canal es estacionario, por lo que la variable temporal no se considerará al no tener variación en el tiempo.

3.2. Power Delay Profile

El PDP proporciona información acerca de la intensidad de potencia de la señal recibida en un canal con múltiples trayectos en función de los retardos de propagación [10].

Es muy empleado para la caracterización de nuestro canal radio, ya que el trabajo con el mismo es sencillo y nos permite obtener figuras de las potencias relativas recibidas en función de dichos retardos para cada uno de los canales del multitrayecto.

Con esto, se puede definir el PDP aproximadamente a partir de la respuesta impulsional del canal, empleando la esperanza al cuadrado del mismo [8]:

$$PDP(\tau) = P_h(\tau_i) \triangleq E_t\{|h(t, \tau)|^2\}, \quad (3)$$

así, podríamos obtener una estimación promediada de las potencias que se transmite en cada canal.

Para proporcionar un ejemplo de lo anteriormente comentado, las Figuras 3.4 y 3.5 corresponden a dos PDP medidos en la banda de 26 GHz, con un ancho de banda de 2 GHz, buscando evitar cualquier tipo de *aliasing* que pueda afectar de forma considerable a nuestra señal medida.

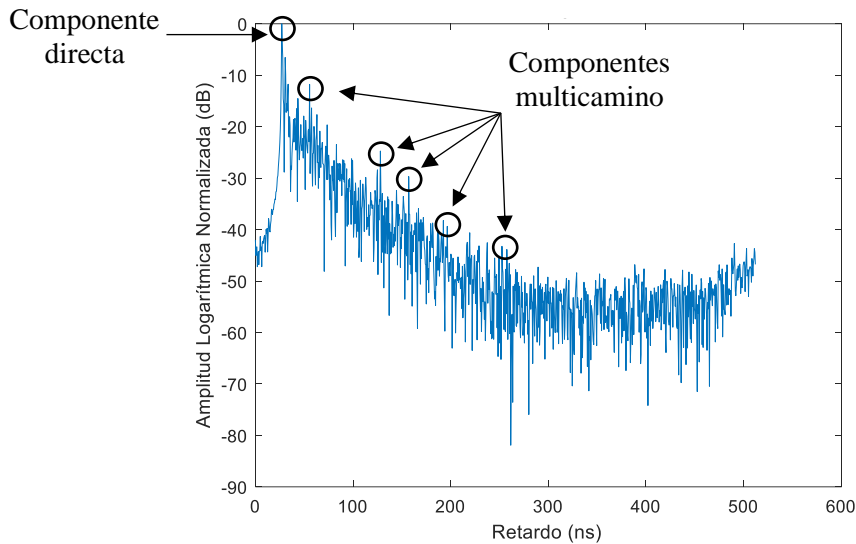


Figura 3.4. PDP en la posición 4-3. Fuente: elaboración propia.

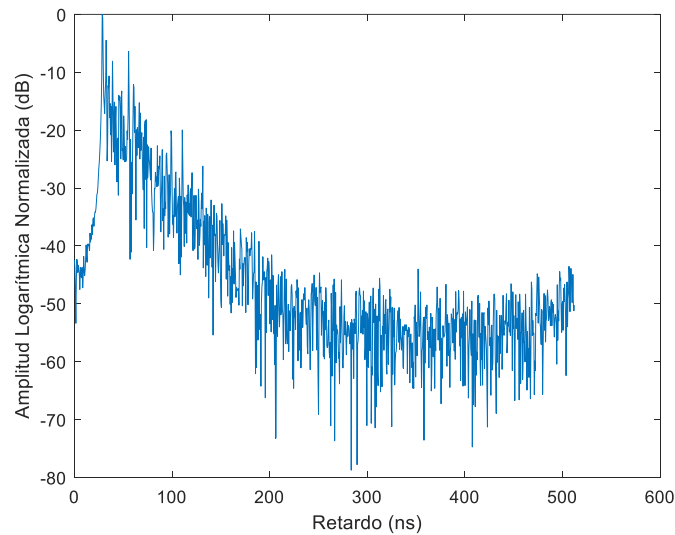


Figura 3.5. PDP en la posición 5-1. Fuente: elaboración propia.

En las Figuras 3.4 y 3.5 se puede apreciar el comportamiento del PDP medido para las posiciones 4-3 y 5-1 del transmisor.

Apreciamos como las señales han sido normalizadas para que se entiendan mejor los valores que han sido obtenidos. El primer pico en las Figuras 3.4 y 3.5 corresponde con la contribución directa de la señal, aquella que no sufre de ningún tipo de efecto de difracción y/o reflexión. También se observan otros picos de señal que hacen referencia a todas aquellas componentes secundarias que también llegan a alcanzar al receptor debido a la propagación multicamino de la señal, la cual anteriormente ya ha sido comentada. Estas componentes secundarias llegan con un determinado retardo respecto a la componente principal. El cálculo del PDP es necesario para poder obtener los siguientes parámetros.

3.3. Delay Spread

Se define el *Delay Spread* como la diferencia de retardos entre la llegada de la componente principal de la señal y el resto de los componentes, debido a la interacción de un escenario con propagación multicamino [11]. Para la obtención del *Delay Spread*, podemos proceder de la siguiente manera [11]:

$$\sigma_{\tau} = \tau_{rms} = \sqrt{\frac{\int_0^{\infty} P_h(\tau)(\tau - \bar{\tau})^2 d\tau}{\int_0^{\infty} P_h(\tau) d\tau}}, \quad (4)$$

donde $\bar{\tau}$ es el retardo medio [11]:

$$\bar{\tau} = \frac{\int_0^{\infty} P_h(\tau)\tau d\tau}{\int_0^{\infty} P_h(\tau) d\tau}. \quad (5)$$

En la Figura 3.6 podemos apreciar la representación de ambos parámetros:

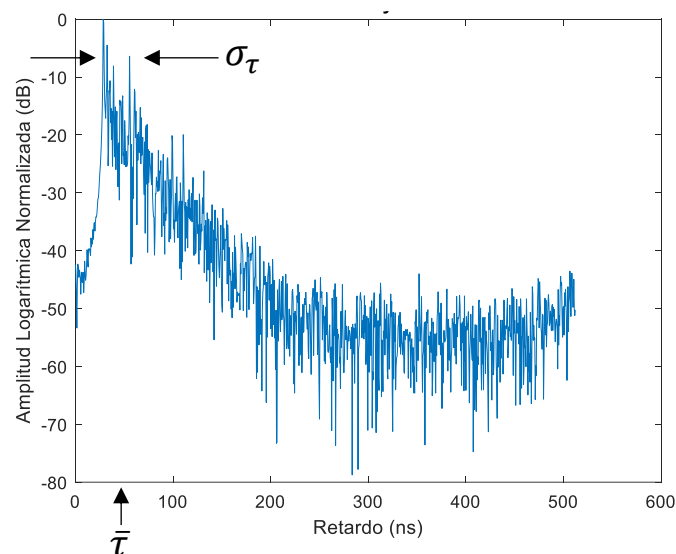


Figura 3.6. *Delay Spread* y retardo medio en PDP. Fuente: elaboración propia.

3.4. Función densidad de probabilidad *Rice*

La FDP *Rice* es una técnica empleada para describir la distribución de probabilidad de toda aquella variable cuya distribución sea *Rice*. Este tipo de distribución se emplea en diferentes escenarios, modelando así la magnitud de una señal que se propaga a través de un canal con desvanecimiento *Rice* [12].

Este tipo de desvanecimiento se puede observar en entornos de comunicación de señal inalámbrica, donde existe tanto una señal principal fuerte como un conjunto de diversas señales reflejadas o dispersadas. Estos entornos pueden ser comunicaciones satelitales, comunicaciones inalámbricas en entornos urbanos o el caso que nos consta en este trabajo, que serían las comunicaciones inalámbricas en entornos de interior. En estos, y tal como ha sido explicado en puntos anteriores, la señal sufre de reflexión en paredes, techos, elementos varios, etc., provocando así que se genere un desvanecimiento *Rice* de la señal a tratar [12]. La función de densidad de probabilidad viene definida por la siguiente ecuación [3, 12]:

$$f(x|v, \sigma) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{(x^2 + v^2)}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{xv}{\sigma^2}\right), \quad (6)$$

donde $I_0(z)$ es una función de Bessel modificada de primer tipo con orden cero, v es el parámetro de no-centralidad, que define la distancia entre el punto de referencia y el centro de la distribución bivariada, y por último σ es el parámetro de escala [3], [12].

3.4.1. Parámetro K

Un entorno con distribución Rayleigh al que se le añade una componente directa, se convierte en un entorno *Rice*. Estos entornos *Rice* se caracterizan normalmente según la relación que se establezca entre la componente directa y la componente reflejada. Dicha relación se conoce como el parámetro K de dicho entorno *Rice* y puede ser definido de la siguiente forma [3, 12]:

$$K = \frac{v^2}{2\sigma^2}. \quad (7)$$

Capítulo 4 Campaña de medidas

4.1. Introducción

En este capítulo se va a analizar la campaña de medidas que fue realizada en los meses de abril y mayo del año 2018 por investigadores del Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (ITEAM) de la Universitat Politècnica de València (UPV). En concreto, estas medidas realizadas en la banda entre 24 GHz y 40 GHz han sido realizadas en el Trabajo Fin de Máster (TFM) de Cristina Catalá [13].

A continuación, se ofrece la campaña de medidas que permiten entender los estudios y análisis que han sido llevados a cabo en la realización de este TFG.

4.2. Entorno de propagación

El entorno que tenemos en consideración corresponde con el laboratorio de *Antenas & Propagation Lab* (APL), que está situado en la Ciudad Politécnica de la Innovación (CPI), dentro del Campus de Vera de la UPV.

En dicho entorno encontramos una gran cantidad de mesas, sillas, pantallas planas y ordenadores y diversos tipos de armarios y muebles que están compuestos por un material metálico. Contemplamos, además, equipos electrónicos como pueden ser los osciladores, grandes *Vector Network Analyzer* (VNA) y una amplia gama de aparatos de medida. También se observa un espacio dedicado al montaje de objetos, que está compuesto por un microscopio y herramientas comunes, ya sean martillos, destornilladores, etc.

En la parte izquierda de la Figura 4.1 podemos ver que se encuentra un elemento metálico que dispone de unas amplias dimensiones y tiene una forma rectangular. Su presencia, junto a los armarios metálicos de la parte derecha de la Figura 4.1 comporta que la sala no llegue a ser rectangular completamente, sino que ambas esquinas queden recortadas, dando un formato más irregular a dicho escenario de medidas.

En cuanto a la infraestructura, la sala presenta paredes de pladur, teniendo amplios ventanales de vidrio en ambos fondos, que difuminan la entrada de luz en la sala mediante grandes estores enrollables, fabricados en un tejido creado a partir de poliéster. El techo por su parte está formado por placas metálicas, además de contener alógenos para las luces, en unas cavidades también de material metálico.

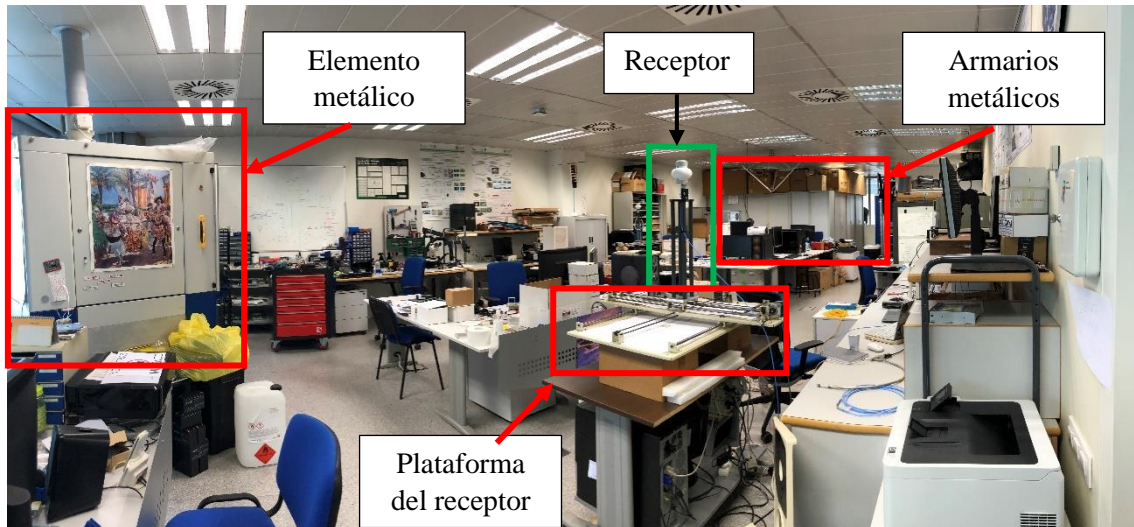


Figura 4.1. Sala de medidas. Fuente: Cristina Catalá, TFM, [13].

En la Figura 4.1 se puede observar una visión generalizada de la sala en la que han sido realizadas todas las medidas. En primera instancia observamos lo que es el receptor que ha sido empleado en para dicho estudio, montado sobre una mesa para ofrecerle la altura deseada con respecto al transmisor del que se disponía.

4.3. Configuración de las medidas

Durante la realización de las medidas se empleó una única antena en transmisión, la cual se desplazaba de forma manual según la posición desde la que se quisiera medir.

En cuanto a la antena receptora, se implementa un *Uniform Rectangular Array* (URA) con dimensiones de 7×7 y está ubicado sobre un sistema capaz de cambiar su posicionamiento en el eje X e Y. La separación entre las columnas y las filas del URA es similar, siendo en ambos casos de 3.04 mm, que queda por debajo de la medida de $\frac{\lambda}{4} = 3.7 \text{ mm}$ en 40 GHz. Para la realización de las medidas, un ordenador era el que se encargaba de gestionar el control entre el VNA y el sistema de posicionamiento que sostiene al URA, permitiendo así la medida del parámetro de *scattering* S_{21} en cada una de las posiciones deseadas. Este mismo ordenador realiza la medida para todo el ancho de banda del que se dispone (24 a 40 GHz). El sistema completo se encuentra ilustrado en las Figuras 4.2 y 4.3, donde se puede apreciar el esquemático de la sonda empleada junto a la antena receptora.

Con respecto al transmisor, se empleó un *Uniform Linear Array* (ULA) con dimensiones 10×1 , cuyas columnas quedaban separadas por 3.04 mm. Puesto que no se podía disponer de un sistema de posicionamiento automático para la antena transmisora, el cambio de posición se realizó de forma manual, colocando minuciosamente la antena transmisora en cada una de las posiciones deseadas.

Cabe destacar que el array en el que estaba situado la antena receptora permanecía fijo en todas las medias, no cambiando su posición en ningún instante. Pese a ello, la antena receptora sí que se desplazaba en la realización de las diferentes medidas, puesto que variaba su posición en

este array que la contenía. La antena transmisora fue posicionada en 22 emplazamientos diferentes, permaneciendo también completamente estática durante la realización de las medidas.

Previo a cada una de las medidas, se realizó una calibración del sistema de medida, teniendo en cuenta todos los elementos, exceptuando las antenas de transmisión y recepción. Dado este caso, los resultados del parámetro S_{21} obtenidos tenían en cuenta la respuesta tanto del canal de propagación como de ambas antenas de forma conjunta.

En la realización las medidas, han sido registrados 8192 puntos en frecuencia del parámetro S_{21} , evitando así que exista algún tipo de *aliasing* temporal. La resolución temporal ha sido de 62.5 ps y la resolución espacial de 18.75 mm. En cuanto a la resolución en frecuencia, dado un *bandwith* (BW) de 16 GHz, obtenemos 1.9534 MHz.

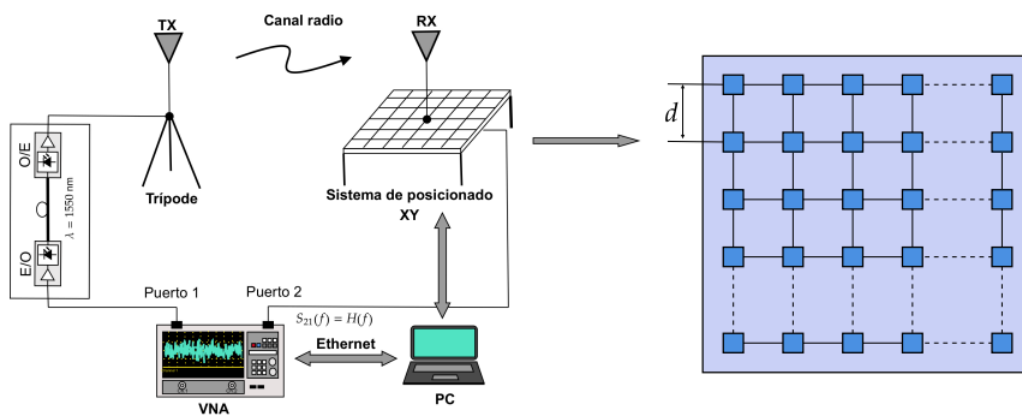


Figura 4.2. Esquemático de la sonda de medición. Fuente: Raúl Cervera, TFG, [14].



Figura 4.3. Sonda y antena en Rx. Vista anterior. Fuente: Cristina Catalá, TFM, [13].

Durante la campaña de elaboración de las medidas, se ha tenido en consideración la necesidad de realizar las medidas de noche y en fines de semana, para asegurar que ninguna acción del personal de laboratorio pudiera involucrarse en los valores obtenidos, lo que provocaría la necesidad de repetir dicha campaña.

En el esquema de la Figura 4.4 se muestra la distribución que ha seguido la antena en transmisión, así como la posición de la antena en recepción:

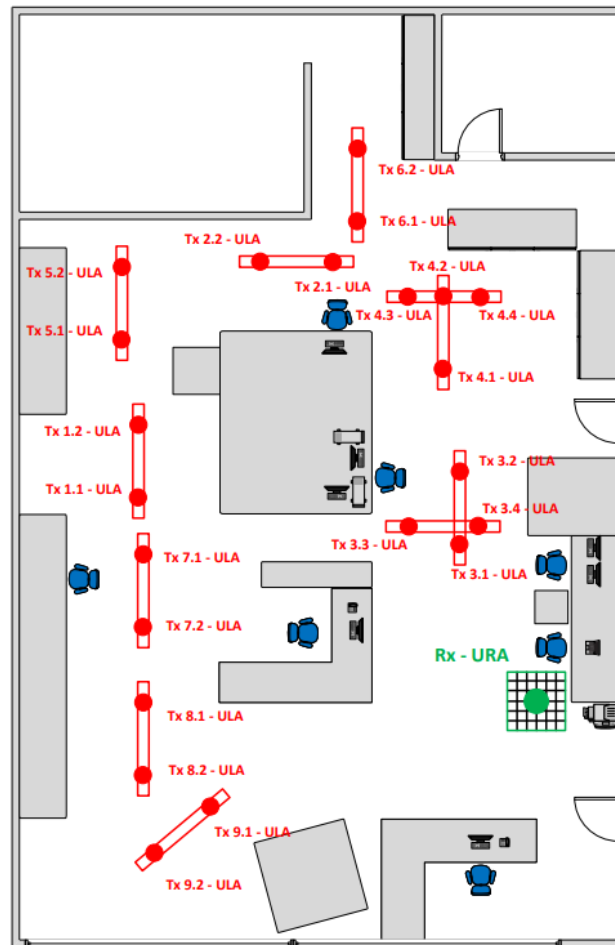


Figura 4.4. Esquema en planta de la distribución de las antenas en la sala de medidas. Fuente: Cristina Catalá, TFM, [13].

A modo de ejemplo, en la siguiente imagen se muestra el sistema con la antena transmisora, siendo en este caso la posición 1.2:



Figura 4.5. Sistema transmisor en la posición 1.2. Fuente: Cristina Catalá, TFM, [13].

Se puede apreciar que en el caso del sistema transmisor, no está posicionado sobre una mesa, puesto que lo que se busca es el poder realizar las medidas desde dos puntos diferentes, separados por alrededor 1 metro de distancia.

El sistema de posicionamiento de la antena transmisora consta de dos patas de madera, que aportan estabilidad y rigidez al sistema, así como una guía metálica que dispone de una correa con la cual se puede desplazar la antena a través de dicha guía. En este caso, al posicionar la antena transmisora en un determinado lugar, cabe la posibilidad de desplazar la misma manteniendo la misma altura y orientación que cuando la antena se sitúa en el otro extremo de la barra de desplazamiento.

Capítulo 5 Resultados

5.1. Introducción

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos a partir de las medidas explicadas anteriormente. Se comienza con diferentes muestras de los análisis realizados en torno al *Delay Spread*, comparando diversos resultados en función del ancho de banda empleado, el posicionamiento entre emisor y receptor y la distancia entre ellos. A continuación, un análisis similar es realizado para el parámetro K, finalizando dicho capítulo realizando comparaciones directas entre *Delay Spread* y el parámetro K.

5.2. Delay Spread

Como ya se ha comentado en el apartado 3.3, se define el *Delay Spread* como la diferencia de retardos entre la llegada de la componente principal de la señal y el resto de los componentes, debido a la interacción de un escenario con propagación multicamino.

Para un correcto estudio del mismo, se han propuesto diferentes análisis que tienen como objetivo el poder extraer la mayor información respecto a las medidas realizadas.

En primera instancia, se va a realizar el estudio del *Delay Spread* en función de la distancia a la que se encuentran el emisor y el receptor. A continuación, se realizará el estudio del *Delay Spread* en función del ancho de banda empleado. Finalmente, se analizará el *Delay Spread* según la posición dentro del array de 10 elementos que tienen cada uno de los emisores.

5.2.1. Delay Spread en función de la distancia

En el análisis del *Delay Spread* en función de la distancia se han tenido que medir las distancias a las que se encontraban cada uno de los diferentes emisores respecto al receptor. Estas distancias podrían ser medidas teniendo en cuenta la componente directa que se obtiene a partir del perfil de retardo de potencia. Dicha componente está asociada a un valor de retardo, ya que el propio PDP es medido en función de un vector de retardos. A partir del valor de retardo de dicha componente principal, podemos calcular la distancia que ha recorrido entre el emisor y receptor multiplicando la misma por la velocidad de propagación de la luz.

Este análisis es llevado a cabo para asegurarnos de que las medidas de las que partíamos inicialmente son correctas y no presentan ningún tipo de fallo. En la Tabla 5.1 se presentan los transmisores ordenados según su distancia al receptor:

Transmisor	Distancia (metros)	Transmisor	Distancia (metros)
9-1	3.15	1-2	6.62
3-1	3.39	4-1	6.94
3-4	3.50	4-2	7.69
8-1	3.64	4-4	8.02
8-2	3.64	4-3	8.04
3-3	3.67	5-1	8.61
7-2	3.77	2-1	8.76
9-2	3.90	2-2	8.94
3-2	4.14	5-2	9.26
7-1	4.22	6-1	9.58
1-1	6.00	6-2	10.33

Tabla 5.1 Distancia entre transmisor y receptor. Fuente: elaboración propia.

Como se puede apreciar, el transmisor más cercano al receptor es el Transmisor 9-1. A partir del transmisor 7-1 se observa un pequeño salto en distancia, pasando de aproximadamente 4.2 metros a 6 del transmisor 1-1. Finalmente, el transmisor más lejano es el 6-2.

Para conseguir analizar correctamente las bandas de milimétricas que se desean, el análisis se ha dividido en 4 frecuencias diferentes, siendo estas 26 GHz, 28 GHz, 33 GHz y 38 GHz. Los anchos de banda que se han tenido en consideración en primera instancia han sido de 2 GHz, por lo que las frecuencias analizadas han sido las que se muestran en la Tabla 5.2.

Frecuencia central (GHz)	Frecuencias comprendidas (GHz)
26	25-27
28	27-29
33	32-34
38	37-39

Tabla 5.2 Frecuencias estudiadas. Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, se han realizado las siguientes Figuras 5.1 a 5.4, que ejemplifican cual es el comportamiento del *Delay Spread* en función de la distancia entre emisor y receptor.

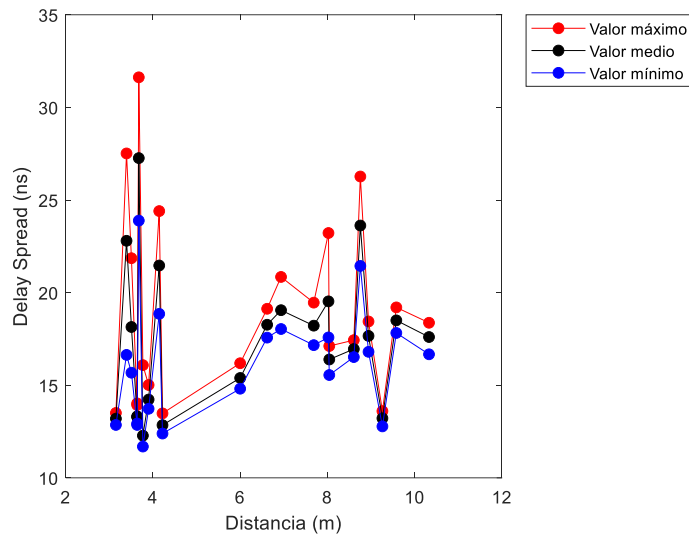


Figura 5.1. *Delay Spread* en función de la distancia. 26 GHz. Fuente: elaboración propia.

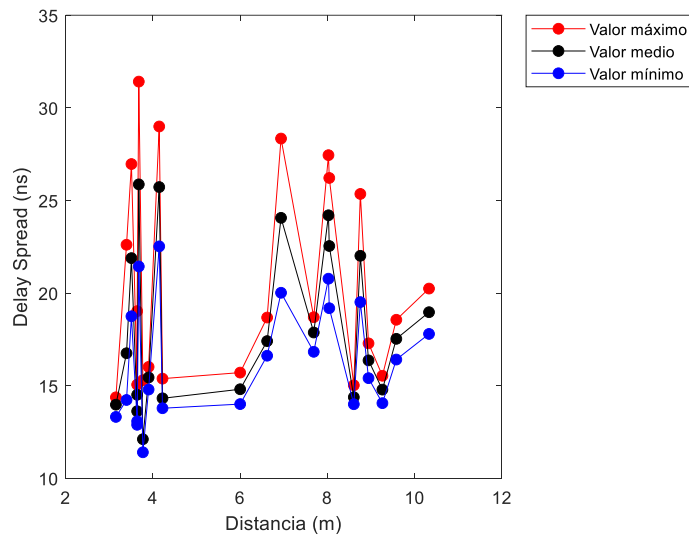


Figura 5.2. *Delay Spread* en función de la distancia. 28 GHz. Fuente: elaboración propia.

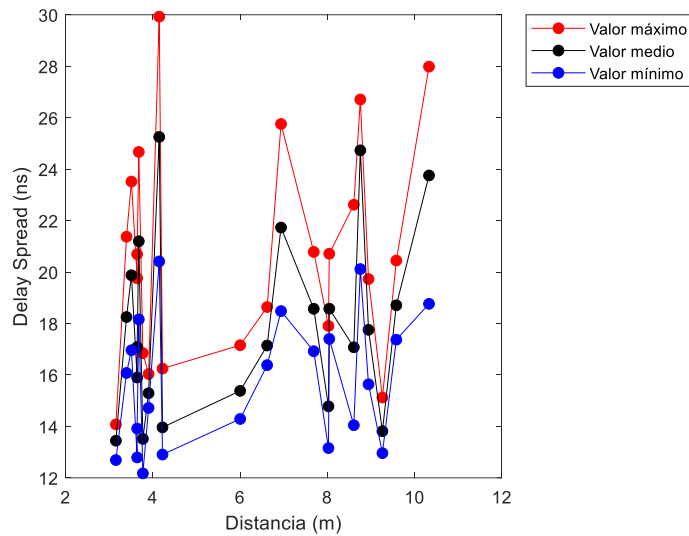


Figura 5.3. *Delay Spread* en función de la distancia. 33 GHz. Fuente: elaboración propia.

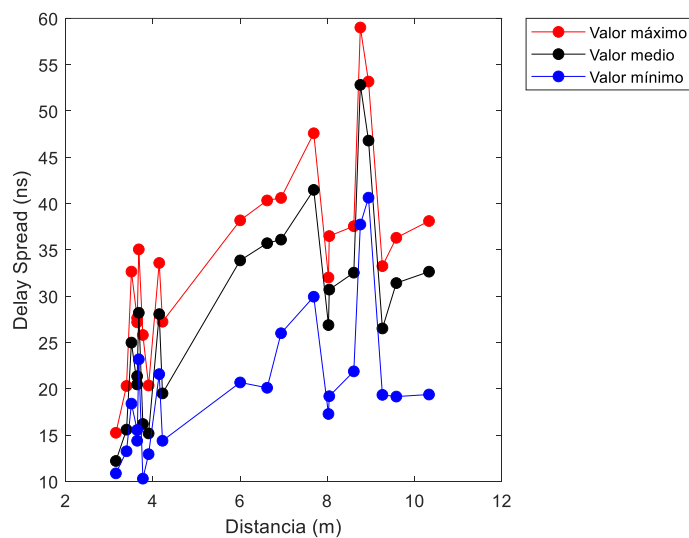


Figura 5.4. *Delay Spread* en función de la distancia. 38 GHz. Fuente: elaboración propia.

Las Figuras 5.1 a 5.4 representan los valores máximos, medios y mínimos para cada una de las posiciones en las que se encuentran los diferentes transmisores, ordenados de menor a mayor distancia. En general, las variaciones entre el mayor valor de *Delay Spread* y el mínimo en cada posición varían entre 10 ns y 20 ns. No obstante, las medidas que más nos interesan en nuestro estudio son los valores medios, puesto que recogen de una forma más correcta como están distribuidos los diferentes *Delay Spread*. Podemos ver los valores medios en las Figuras 5.5, 5.6, 5.7 y 5.8.

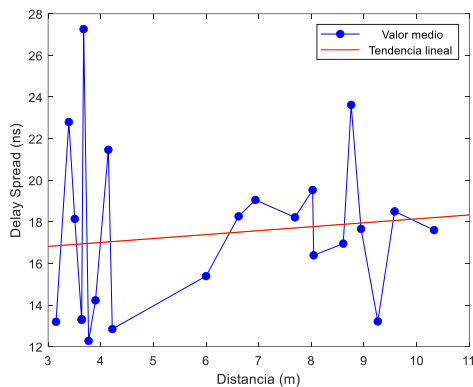


Figura 5.5. *Delay Spread* medio en función de la distancia. 26 GHz. Fuente: elaboración propia.

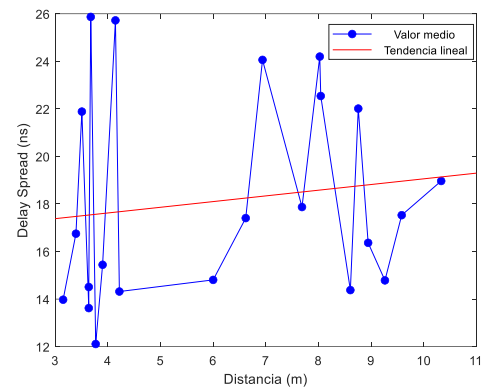


Figura 5.6. *Delay Spread* medio en función de la distancia. 28 GHz. Fuente: elaboración propia.

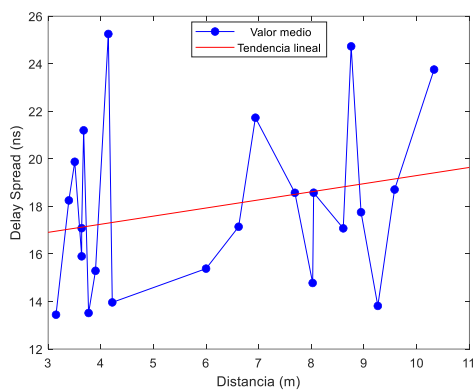


Figura 5.7. *Delay Spread* medio en función de la distancia. 33 GHz. Fuente: elaboración propia.

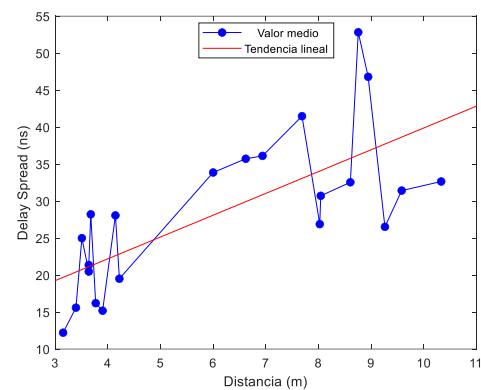


Figura 5.8. *Delay Spread* medio en función de la distancia. 38 GHz. Fuente: elaboración propia.

Analizando lo observado en dichas figuras, vemos una tendencia ascendente de los valores medios del *Delay Spread* a medida que aumenta la distancia entre emisor y receptor. En todos los transmisores que se encontraban por debajo de los 6 metros, las diferencias no son muy notorias y el comportamiento es similar en todas las frecuencias medidas. A medida que aumentamos la distancia, sí que se observa que para aquellos transmisores que se encuentran a más de 6 metros de distancia, a medida que aumenta la frecuencia, tienden a aumentar sus valores de *Delay Spread*.

Ante la necesidad de comprobar que dicho comportamiento no se vea comprometido por el ancho de banda empleado en cada una de las anteriores medidas, en el próximo análisis se va a sustituir el ancho de banda anterior de 2 GHz, por otros de 3 GHz, 4 GHz. Cabe destacar que estos valores vienen definidos por el impedimento de no disponer de medidas en un rango más amplio de frecuencias, limitándonos los anchos de banda a un máximo de 4 GHz por frecuencia medida. Por tanto, las medidas en frecuencia que se van a considerar son las siguientes:

Frecuencia central (GHz)	Frecuencias comprendidas (GHz)
26	24.5-27.5
28	26.5-29.5
33	31.5-34.5
38	36.5-39.5

Tabla 5.3 Frecuencias estudiadas. Ancho de banda de 3 GHz. Fuente: elaboración propia.

Frecuencia central (GHz)	Frecuencias comprendidas (GHz)
26	24-28
28	26-30
33	31-35
38	36-40

Tabla 5.4 Frecuencias estudiadas. Ancho de banda de 4 GHz. Fuente: elaboración propia.

Para las frecuencias definidas en la Tabla 5.3, obtenemos los resultados que se visualizan en las Figuras 5.9, 5.10, 5.11 y 5.12.

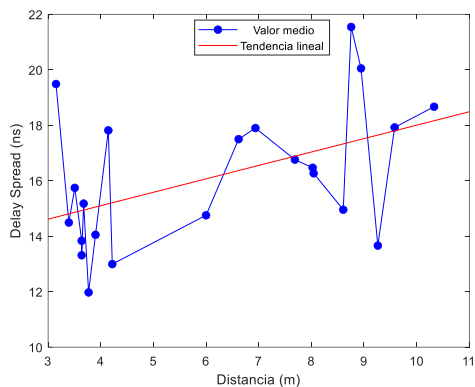


Figura 5.9. *Delay Spread* medio a 26 GHz en función de la distancia. BW = 3 GHz. Fuente: elaboración propia.

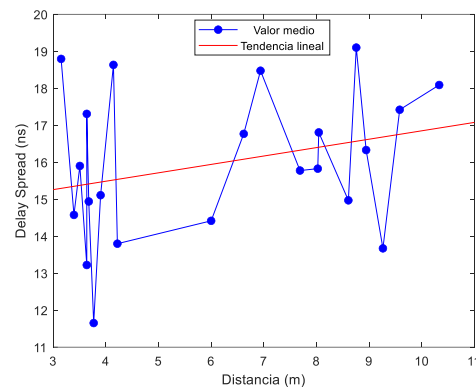


Figura 5.10. *Delay Spread* medio a 28 GHz en función de la distancia. BW = 3 GHz. Fuente: elaboración propia.

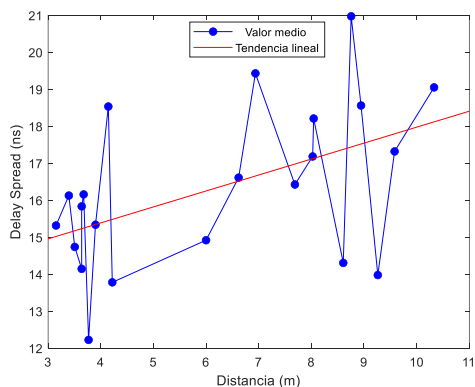


Figura 5.11. *Delay Spread* medio a 33 GHz en función de la distancia. BW = 3 GHz. Fuente: elaboración propia.

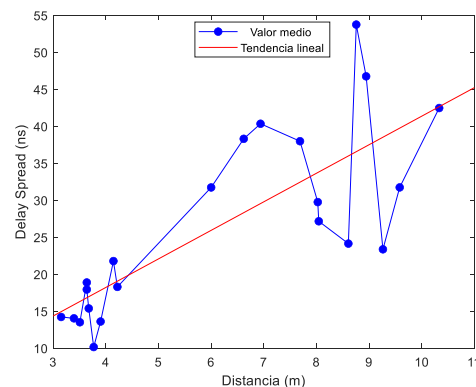


Figura 5.12. *Delay Spread* medio a 38 GHz en función de la distancia. BW = 3 GHz. Fuente: elaboración propia.

En cuanto a los resultados obtenidos para un ancho de banda de 4 GHz, correspondientes a las frecuencias mencionadas en la Tabla 5.4, pueden ser visualizados en las siguientes Figuras 5.13, 5.14, 5.15 y 5.16:

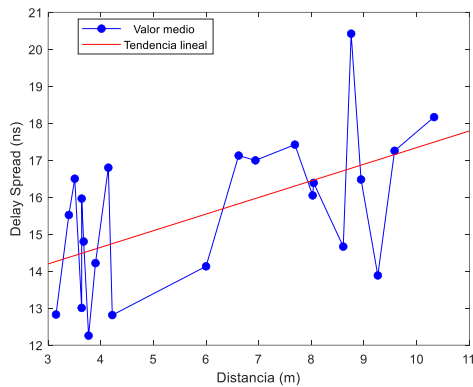


Figura 5.13. *Delay Spread* medio a 26 GHz en función de la distancia. BW = 4 GHz. Fuente: elaboración propia.

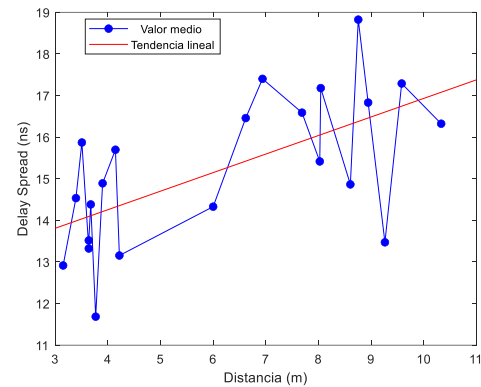


Figura 5.14. *Delay Spread* medio a 28 GHz en función de la distancia. BW = 4 GHz. Fuente: elaboración propia.

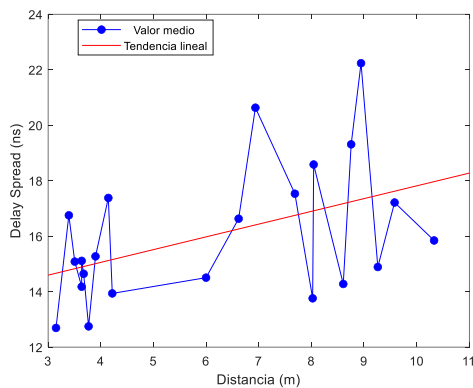


Figura 5.15. *Delay Spread* medio a 33 GHz en función de la distancia. BW = 4 GHz. Fuente: elaboración propia.

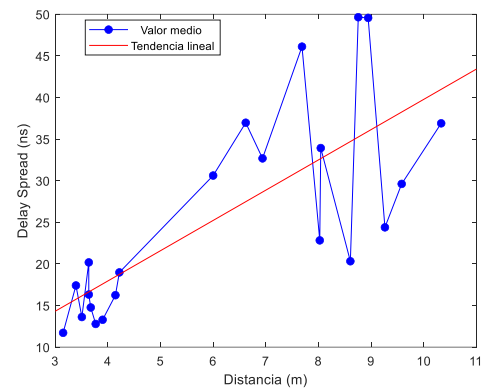


Figura 5.16. *Delay Spread* medio a 38 GHz en función de la distancia. BW = 4 GHz. Fuente: elaboración propia.

Al analizar las Figuras 5.9 a 5.12 y Figuras 5.13 a 5.16 para un ancho de banda de 3 GHz y de 4 GHz, podemos comprobar que no existen diferencias notorias respecto a las que se muestran en las Figuras 5.5 a 5.8 con un ancho de banda de 2 GHz. Para poder comprobar estos resultados de una forma más numérica, se muestran en las tablas 5.5, 5.6, 5.7 y 5.8 los valores que han sido obtenidos para cada una de las frecuencias anteriormente descritas.

	Tx 9.1	Tx 3.1	Tx 3.4	Tx 8.1	Tx 8.2	Tx 3.3	Tx 7.2	Tx 9.2	Tx 3.2	Tx 7.1	Tx 1.1
2 GHz	13.2	22.8	18.14	13.29	13.32	27.26	12.28	14.22	21.46	12.85	15.39
3 GHz	19.49	14.49	15.74	13.84	13.31	15.17	11.97	14.05	17.81	12.99	14.75
4 GHz	12.83	15.52	16.5	13	15.96	14.8	12.26	14.21	16.8	12.81	14.13
	Tx 1.2	Tx 4.1	Tx 4.2	Tx 4.4	Tx 4.3	Tx 5.1	Tx 2.1	Tx 2.2	Tx 5.2	Tx 6.1	Tx 6.2
2 GHz	18.27	19.05	18.22	19.53	16.39	16.96	23.62	17.66	13.21	18.5	17.6
3 GHz	17.5	17.9	16.76	16.47	16.27	14.95	21.54	20.05	13.66	17.92	18.67
4 GHz	17.12	17	17.42	16.05	16.38	14.66	20.42	16.48	13.88	17.25	18.17

Tabla 5.5 Valores *Delay Spread* para 26 GHz según ancho de banda. Fuente: elaboración propia.

	Tx 9.1	Tx 3.1	Tx 3.4	Tx 8.1	Tx 8.2	Tx 3.3	Tx 7.2	Tx 9.2	Tx 3.2	Tx 7.1	Tx 1.1
2 GHz	13.97	16.75	21.89	13.62	14.5	25.87	12.11	15.44	25.72	14.31	14.8
3 GHz	18.79	14.58	15.9	13.22	17.31	14.94	11.65	15.1	18.63	13.8	14.41
4 GHz	12.91	14.53	15.87	13.32	13.52	14.38	11.68	14.89	15.96	13.15	14.33
	Tx 1.2	Tx 4.1	Tx 4.2	Tx 4.4	Tx 4.3	Tx 5.1	Tx 2.1	Tx 2.2	Tx 5.2	Tx 6.1	Tx 6.2
2 GHz	17.4	24.06	17.87	24.2	22.54	14.38	22.01	16.37	14.79	17.53	18.97
3 GHz	16.77	18.47	15.77	15.83	16.81	14.97	19.1	16.33	13.67	17.42	18.09
4 GHz	14.46	17.4	16.58	15.41	17.18	14.86	18.82	16.82	13.47	17.29	16.32

 Tabla 5.6 Valores *Delay Spread* para 28 GHz según ancho de banda. Fuente: elaboración propia.

	Tx 9.1	Tx 3.1	Tx 3.4	Tx 8.1	Tx 8.2	Tx 3.3	Tx 7.2	Tx 9.2	Tx 3.2	Tx 7.1	Tx 1.1
2 GHz	13.44	18.25	19.88	15.9	17.08	21.2	13.52	15.29	25.25	13.96	15.38
3 GHz	15.32	16.12	14.74	14.14	15.83	16.16	12.22	15.34	18.53	13.78	14.92
4 GHz	12.69	16.75	15.08	14.18	15.11	14.64	12.75	15.27	17.38	13.94	14.50
	Tx 1.2	Tx 4.1	Tx 4.2	Tx 4.4	Tx 4.3	Tx 5.1	Tx 2.1	Tx 2.2	Tx 5.2	Tx 6.1	Tx 6.2
2 GHz	17.14	21.73	18.57	14.78	18.57	17.08	24.73	17.75	13.81	18.71	23.75
3 GHz	16.61	19.43	16.42	17.18	18.21	14.3	20.97	18.56	13.98	17.32	19.05
4 GHz	16.63	20.63	17.53	13.76	18.58	14.28	19.3	22.23	14.89	17.21	15.84

 Tabla 5.7 Valores *Delay Spread* para 33 GHz según ancho de banda. Fuente: elaboración propia.

	Tx 9.1	Tx 3.1	Tx 3.4	Tx 8.1	Tx 8.2	Tx 3.3	Tx 7.2	Tx 9.2	Tx 3.2	Tx 7.1	Tx 1.1
2 GHz	12.21	15.59	24.99	20.48	21.36	28.22	16.2	15.19	28	19.5	33.87
3 GHz	14.21	14.03	13.5	18.88	17.93	15.37	10.15	13.6	21.77	18.28	31.72
4 GHz	11.72	17.41	13.62	20.18	16.32	14.76	12.78	13.28	16.24	18.98	30.61
	Tx 1.2	Tx 4.1	Tx 4.2	Tx 4.4	Tx 4.3	Tx 5.1	Tx 2.1	Tx 2.2	Tx 5.2	Tx 6.1	Tx 6.2
2 GHz	35.72	36.11	41.48	26.88	30.72	32.54	52.82	46.8	26.52	31.42	32.64
3 GHz	38.3	40.33	37.97	29.74	27.15	24.13	53.74	46.74	23.36	31.73	42.46
4 GHz	36.96	36.67	46.10	22.82	33.91	20.31	49.64	49.56	24.39	29.61	36.89

 Tabla 5.8 Valores *Delay Spread* para 38 GHz según ancho de banda. Fuente: elaboración propia.

Al analizar los datos de las anteriores tablas, se comprueba lo mencionado anteriormente. Al cambiar el ancho de banda empleado no repercute de forma notoria en las medidas de los diferentes transmisores. En cambio, sí que se puede demostrar un comportamiento ascendente de los valores de *Delay Spread* a medida que aumenta tanto la distancia como la frecuencia. En el rango de frecuencia de los 38 GHz, se aprecian como los valores se disparan, siendo en las distancias más lejanas más altos que para el resto de las frecuencias.

Para finalizar el estudio del *Delay Spread* en función de la distancia, se han realizado las medidas para un ancho de banda mayor, siendo en este caso de 16 GHz. Se muestran los resultados en la Figura 5.17:

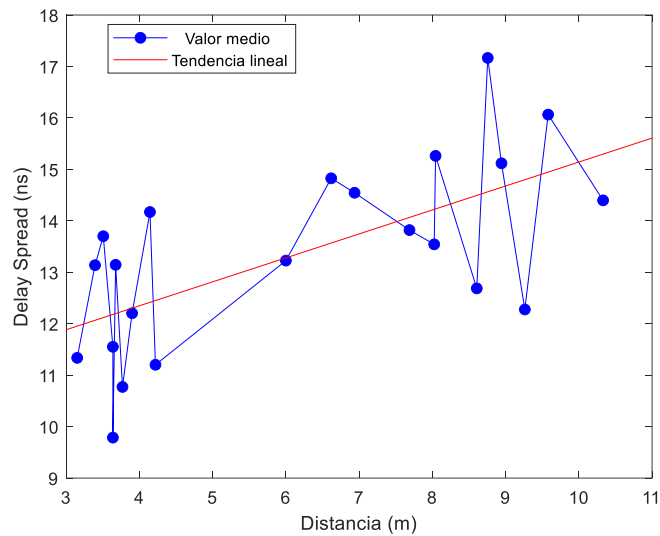


Figura 5.17. *Delay Spread* en función de la distancia. BW = 16 GHz. Fuente: elaboración propia.

En el caso estudiado en la Figura 5.17, se puede apreciar nuevamente la tendencia ascendente de la *Delay Spread* con la distancia. Además, al emplear un ancho de banda mucho mayor, se aprecia que los valores difieren menos entre las distancias más bajas y las más altas, igualando en cierta medida los resultados obtenidos.

Para comprobar si las diferencias entre los valores máximos y mínimos también se han reducido respecto al ancho de banda de 2 GHz, se puede observar la Figura 5.18:

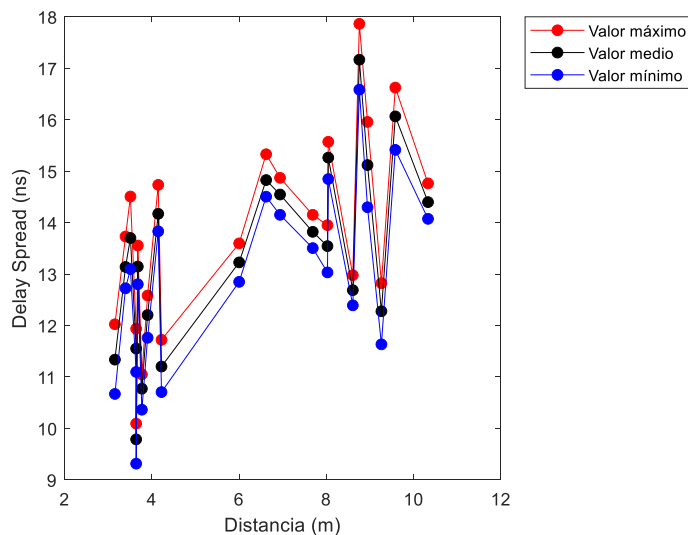


Figura 5.18. *Delay Spread* en función de la distancia. BW = 16 GHz. Fuente: elaboración propia.

En efecto, los valores máximos y mínimos se encuentran mucho más comprimidos, siendo en este caso donde menor diferencia hay entre los mismos. Mientras que en las Figuras 5.1 a 5.4 se podían apreciar diferencias en torno a los 20 o 30 ns entre los valores más grande y los menores, en este caso dicha diferencia apenas llega a los 10 ns.

5.2.2. *Delay Spread* en función del ancho de banda

Continuando con lo analizado en el apartado anterior, se ha visto que el ancho de banda no influye de forma notoria en los valores medios de las medidas del *Delay Spread*. No obstante, sí que se ha apreciado que al aumentar el ancho de banda a valores mayores, los resultados obtenidos presentan menores diferencias entre los valores más grandes y los más pequeños, tal y como se ha podido ver entre las Figuras 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4 con respecto a la Figura 5.18. Para comprobar si dicho comportamiento se mantiene presente en el resto de los anchos de banda analizados, podemos representar en *Delay Spread* según el ancho de banda empleado en su medida. El resultado se puede apreciar en la Figura 5.19:

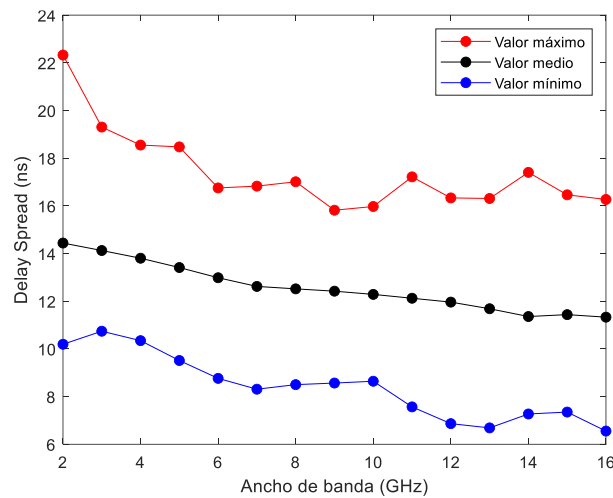


Figura 5.19. *Delay Spread* por ancho de banda en frecuencia. Fuente: elaboración propia.

Cabe destacar que en la realización de dicha medida, las frecuencias empleadas han sido centradas a la frecuencia de 32 GHz, dentro de la banda total de medida (24 GHz a 40 GHz). Esto explica que los valores más altos en 2 GHz, 3 GHz y 4 GHz no lleguen a las cotas que se demostraban para los 38 GHz medidos anteriormente. Para clarificar qué uso de frecuencias ha sido empleado, se dispone de la tabla 5.9:

Ancho de banda (GHz)	Frecuencias comprendidas (GHz)
2	31-33
3	30.5-33.5
4	30-34
5	29.5-34.5
6	29-35
7	28.5-35.5
8	28-36
9	27.5-36.5
10	27-37
11	26.5-37.5
12	26-38
13	25.5-38.5
14	25-39
15	24.5-39.5
16	24-40

Tabla 5.9 Frecuencias empleadas para cálculo de *Delay Spread*. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 5.19 se aprecia claramente como, a medida que aumenta el ancho de banda, los valores de los *Delay Spread*, centrados en la frecuencia de 32 GHz, disminuyen. En dicha figura también se aprecia cómo se reduce la diferencia entre los valores máximos y mínimos a medida que aumenta el ancho de banda empleado, lo que podría dar lugar al empleo de anchos de banda más grandes si se desea que las medidas queden más concentradas en torno a sus valores medios.

5.2.3. *Delay Spread* en función del *Threshold*

Para finalizar el estudio del *Delay Spread*, se abarca una interesante cuestión y es el ver cómo afecta el uso de un *Threshold* (TH) diferente según a que frecuencia se encuentre la señal que estamos midiendo. Las frecuencias más elevadas también tienden a presentar valores de ruido más elevados, por lo que podría ser recomendable el uso de unos TH menores en dichos casos. A continuación, en la Figura 5.20, se puede ver el efecto que tiene el *Delay Spread* en función de la variación del TH y en función de la frecuencia a la que se analiza la medida.

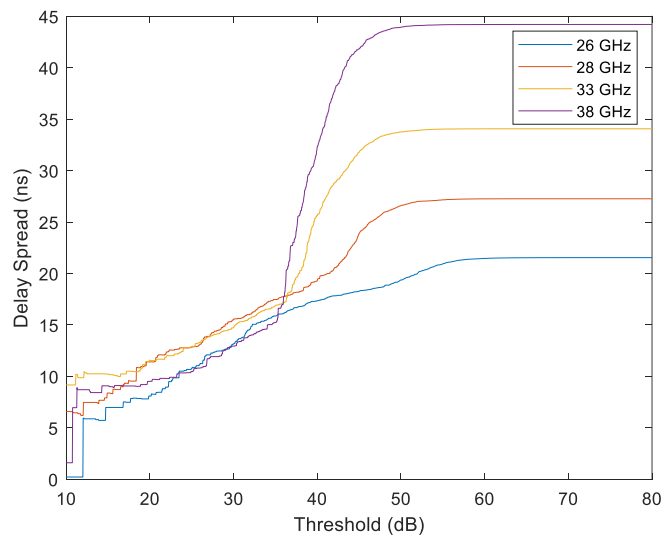


Figura 5.20. *Delay Spread* en función del TH. Fuente: elaboración propia.

Como cabía esperar, en la Figura 5.20 se aprecia como el valor del TH es determinante de cara a la obtención de unos buenos resultados en función de la frecuencia a la que se haya realizado la medida. Se puede observar que en todos los casos se inicia con un aumento del *Delay Spread* a la vez que aumenta el TH. A partir de un determinado punto, dicho aumento del *Delay Spread* comienza a verse reducido, llegando a estabilizarse por completo.

Se aprecia como a medida que aumenta la frecuencia, dicha estabilización se realiza antes, en valores de TH ligeramente inferiores. Pese a ello, los valores de *Delay Spread* que se encuentran al llegar a las estabilizaciones son muy inferiores en caso de emplear frecuencias menores y mucho más grandes en frecuencias más elevadas.

5.3. Parámetro K

El análisis del parámetro K es un buen método para analizar la calidad de la señal que se transmite, ya que proporciona una relación entre las potencias de la componente con visión directa y la componente difusa, y por tanto, puede ser empleado como una medida de la calidad de dicho enlace.

El valor del parámetro K nos da una medida acerca del nivel de desvanecimiento que se tiene, siendo $K=0$ el caso de desvanecimiento más severo (desvanecimiento *Rayleigh*) y $K=\infty$ el de menor gravedad.

En este análisis se va a llevar a cabo el estudio del parámetro K en función de la distancia entre transmisor y receptor, así como un estudio del parámetro K en función del ancho de banda empleado, siguiendo así una estructura similar a la que se ha seguido para el análisis del *Delay Spread*.

5.3.1. Parámetro K en función de la distancia

En este análisis se han tenido en cuenta las mismas distancias que servían como referencia en el caso del estudio del *Delay Spread* y las cuáles podemos encontrar en la Tabla 5.1. También cabe destacar que en primera instancia se van a mostrar los resultados empleando un ancho de banda de 2 GHz, centrándonos nuevamente en las principales frecuencias de la banda de milimétricas, que son 26 GHz, 28 GHz, 33 GHz y 38 GHz. Los datos quedan recogidos en la Tabla 5.2.

Teniendo en consideración dichos datos, se han representado los valores máximos, mínimos y medios para el parámetro K en función de la distancia en las Figuras 5.21 a 5.24:

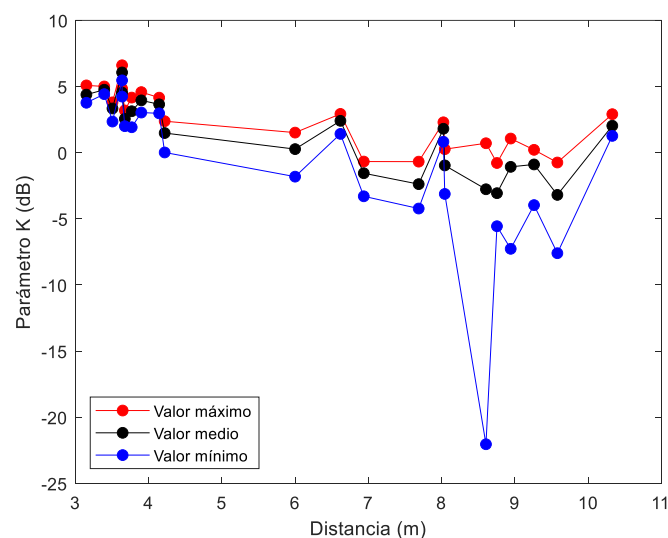


Figura 5.21. Parámetro K a 26 GHz en función de la distancia. BW = 2 GHz. Fuente: elaboración propia.

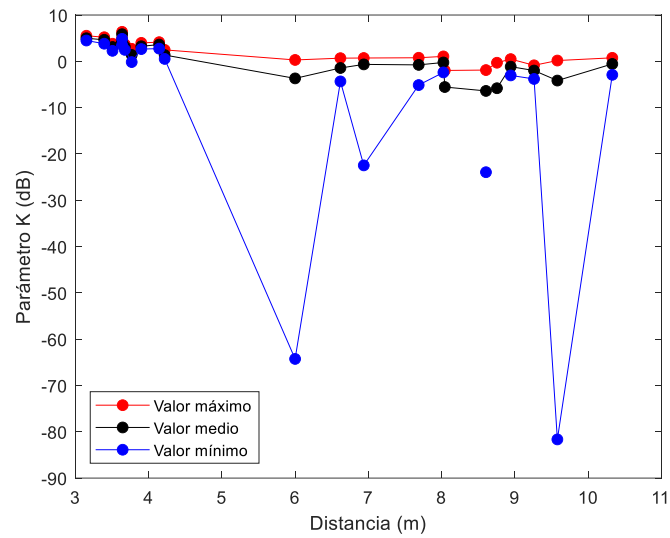


Figura 5.22. Parámetro K a 28 GHz en función de la distancia. BW = 2 GHz. Fuente: elaboración propia.

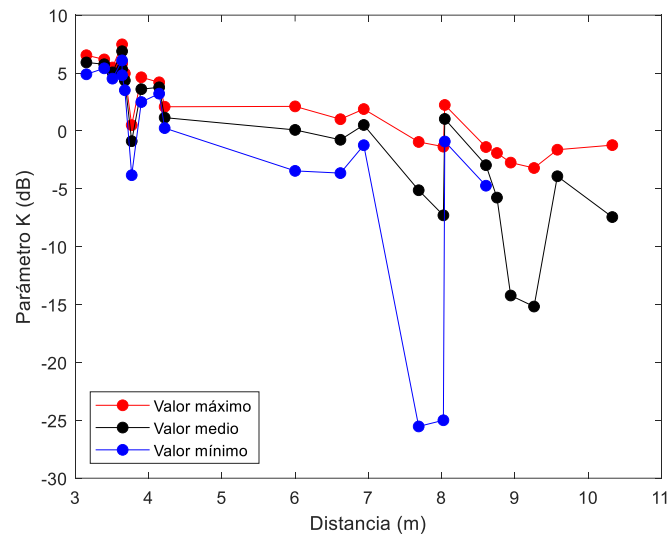


Figura 5.23. Parámetro K a 33 GHz en función de la distancia. BW = 2 GHz. Fuente: elaboración propia.

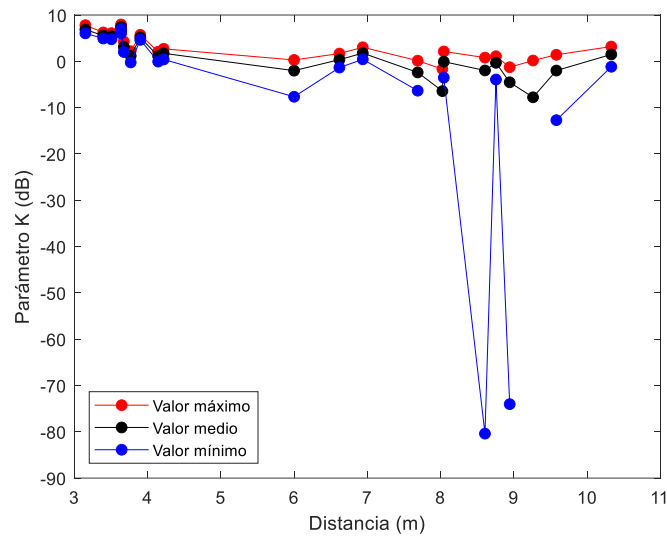


Figura 5.24. Parámetro K a 38 GHz en función de la distancia. BW = 2 GHz. Fuente: elaboración propia.

Los valores representados del parámetro K se muestran en escala logarítmica, puesto que es mucho más usual representarlos de esta forma y no en escala lineal.

En las Figuras 5.21 a 5.24 se observa una clara tendencia descendente del parámetro K a medida que aumenta la distancia. No se aprecian diferencias notorias entre valores máximos y mínimos en las propias medidas, salvo casos específicos en los que algunos valores mínimos muestran un comportamiento diferente. Esto es debido al posicionamiento que tienen dichos transmisores y que ven afectada su media de manera puntual.

Al igual que en el estudio del *Delay Spread*, se necesita visualizar únicamente los valores medios de las medidas, puesto que muestran unos valores más correctos para un caso de estudio como este. En las Figuras 5.25 a 5.28 se muestran los valores medios para las frecuencias anteriormente citadas:

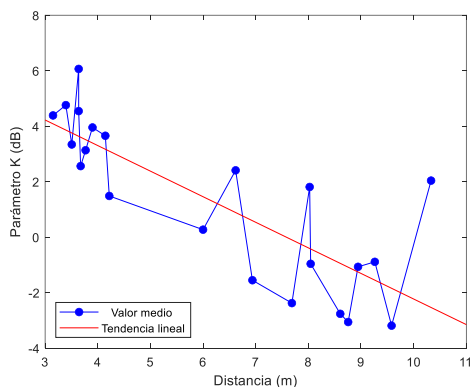


Figura 5.25. Parámetro K medio a 26 GHz en función de la distancia. BW = 2 GHz. Fuente: elaboración propia.

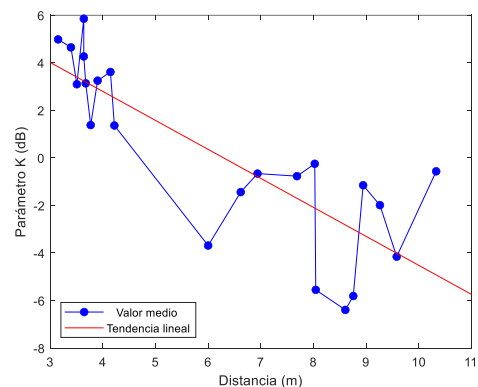


Figura 5.26. Parámetro K medio a 28 GHz en función de la distancia. BW = 2 GHz. Fuente: elaboración propia.

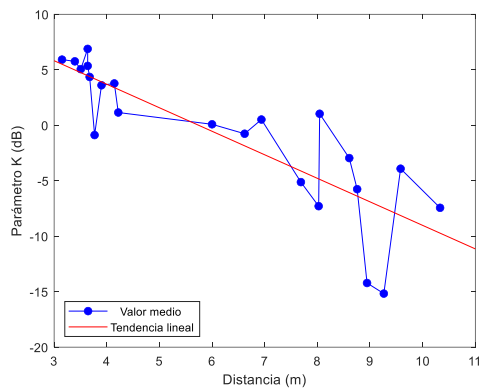


Figura 5.27. Parámetro K medio a 33 GHz en función de la distancia. BW = 2 GHz. Fuente: elaboración propia.

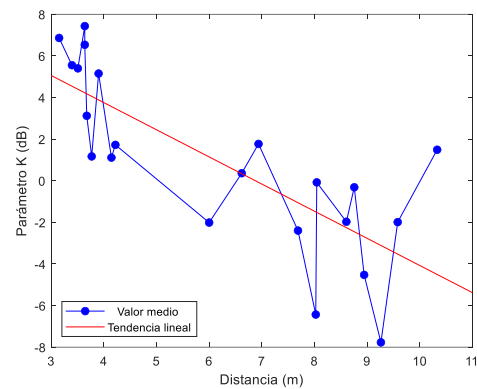


Figura 5.28. Parámetro K medio a 38 GHz en función de la distancia. BW = 2 GHz. Fuente: elaboración propia.

En las Figuras 5.25, 5.26, 5.27 y 5.28 se muestra claramente la tendencia descendente que ya se había analizado en las Figuras 5.21 a 5.24. También se observa que todos los valores del parámetro K quedan recogidos en el rango de -10 dB a 10 dB.

En general, las señales a distancias menores están mucho más comprimidas en torno a los 2 a 8 dB, mostrando una buena calidad en la medida.

Teniendo en consideración que la finalidad del parámetro K es dar una idea de la calidad de la señal que ha sido transmitida, podemos ver que la misma es mejor para distancias menores que para distancias más grandes, ya que el valor obtenido es mayor. Esto indica que existe una mayor diferenciación de la componente directa respecto a las componentes difusas, por lo que tenemos mejor calidad en dicha señal.

Otro estudio relacionado con el parámetro K y la distancia, es cómo se comporta la calidad de la señal en función del ancho de banda que se emplee. Este análisis es necesario para descartar posibles errores en la medida y valorar si en unas condiciones *indoor* sería factible el uso de mayores anchos de banda para reducir el efecto producido por la propagación multicamino de la señal. Por ello, se han realizado medidas empleando los anchos de banda de 3 GHz y 4 GHz.

Las medidas son las mismas realizadas posteriormente para 2 GHz, puesto que se busca observar el comportamiento partiendo de las mismas condiciones que las mostradas anteriormente. Las frecuencias a considerar se muestran resumidas en las Tablas 5.3 y 5.4. Para el ancho de banda de 3 GHz, los resultados son los de las Figuras 5.29 a 5.32:

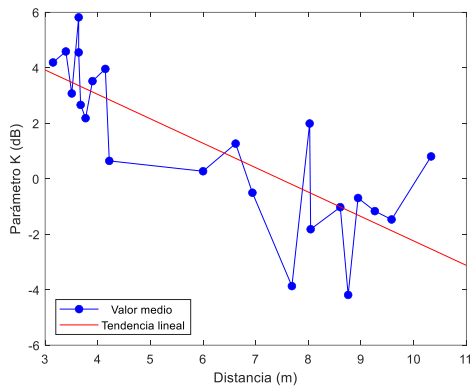


Figura 5.29. Parámetro K medio a 26 GHz en función de la distancia. BW = 3 GHz. Fuente: elaboración propia.

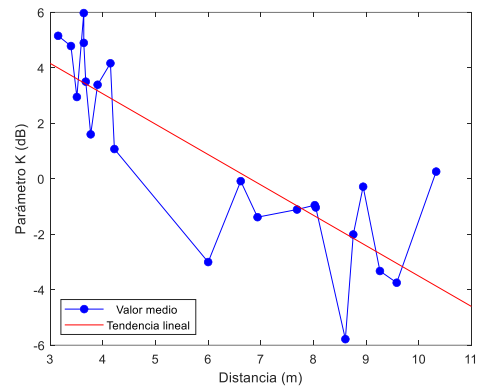


Figura 5.30. Parámetro K medio a 28 GHz en función de la distancia. BW = 3 GHz. Fuente: elaboración propia.

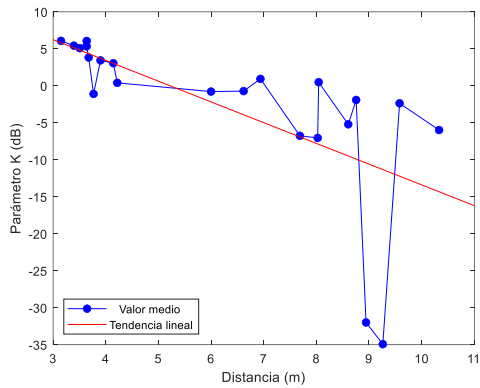


Figura 5.31. Parámetro K medio a 33 GHz en función de la distancia. BW = 3 GHz. Fuente: elaboración propia.

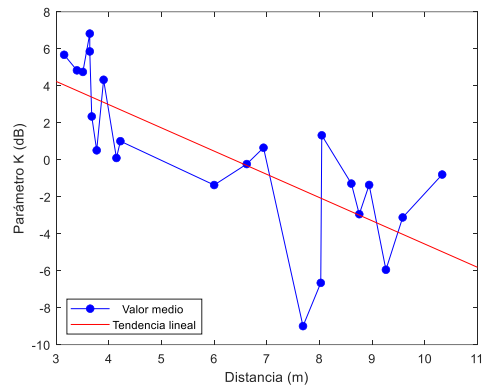


Figura 5.32. Parámetro K medio a 38 GHz en función de la distancia. BW = 3 GHz. Fuente: elaboración propia.

Para el ancho de banda de 4 GHz, los resultados se muestran en las Figuras 5.33 a 5.36:

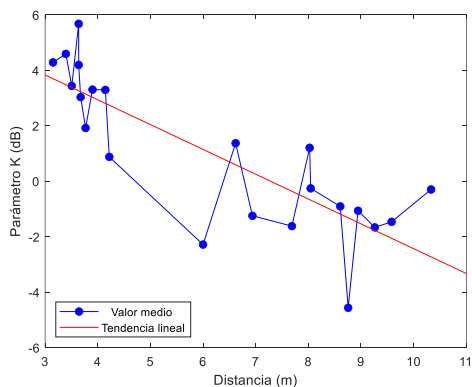


Figura 5.33. Parámetro K medio a 26 GHz en función de la distancia. BW = 4 GHz. Fuente: elaboración propia.

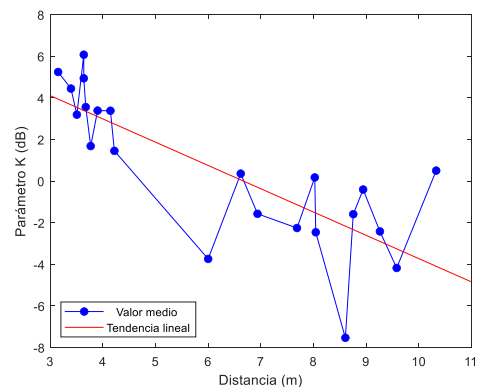


Figura 5.34. Parámetro K medio a 28 GHz en función de la distancia. BW = 4 GHz. Fuente: elaboración propia.

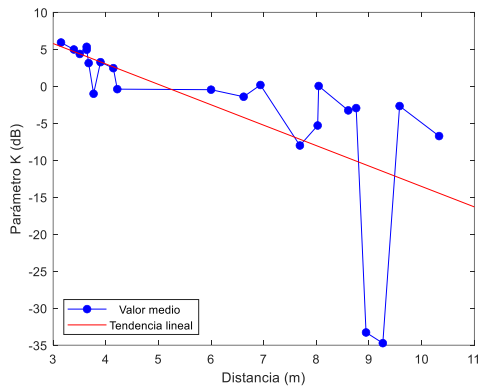


Figura 5.35. Parámetro K medio a 33 GHz en función de la distancia. BW = 4 GHz. Fuente: elaboración propia.

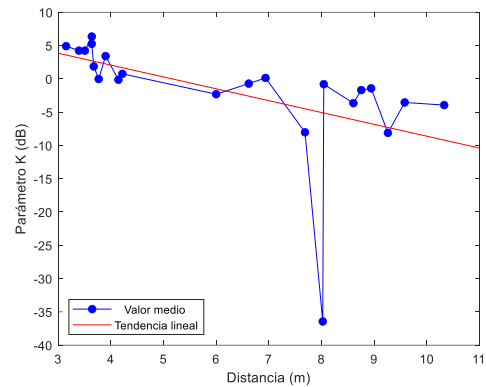


Figura 5.36. Parámetro K medio a 38 GHz en función de la distancia. BW = 4 GHz. Fuente: elaboración propia.

Tal y como se puede comprobar, en todos los casos medidos el parámetro K disminuye con la distancia, lo que verifica lo visto en las Figuras 5.25 a 5.28. Respecto al uso de distintas frecuencias, no se han obtenido diferencias considerables para poder definir que una frecuencia presenta mejor calidad que el resto de ellas. Es cierto que, a frecuencias mayores, en distancias elevadas se muestran ciertos comportamientos que no guardan relación con el resto, lo que podría verse dado porque al aumentar la frecuencia también pueden producirse mayores dispersiones de la señal transmitida. Este comportamiento no se presenta en las frecuencias de 26 GHz y 28 GHz, puesto que en estas la dispersión que puede tener la señal es menor, mejorando de forma discreta las medidas realizadas.

Por último, se han realizado las mismas medidas con un ancho de banda mucho mayor, en este caso de 16 GHz, buscando si puede visualizarse alguna diferencia respecto a las anteriormente presentadas.

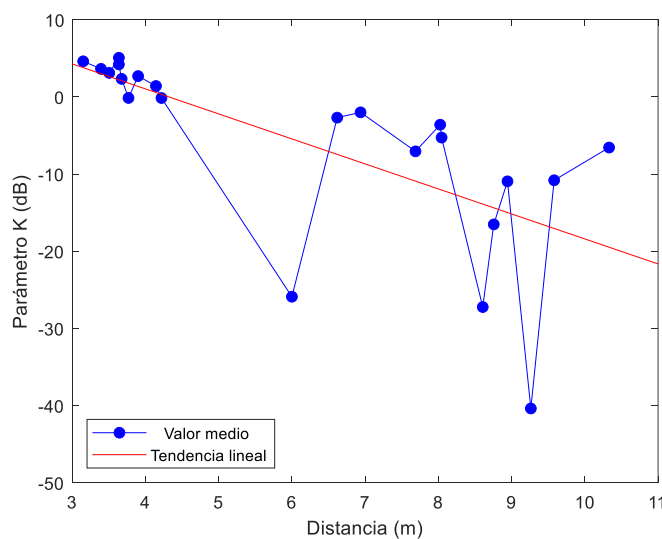


Figura 5.37. Parámetro K en función de la distancia. BW = 16 GHz. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 5.37 se ha realizado el análisis del parámetro K en función de la distancia para mayor ancho de banda que tenemos disponible en estas medidas realizadas. El comportamiento es similar a los vistos en Figuras 5.25 a 5.36, manteniendo la clara tendencia descendente del parámetro K con la distancia y evidenciando que en las distancias que se encuentran a más de 6 metros de longitud los valores difieren considerablemente de la recta de regresión obtenida, siendo esto una clara muestra de menor calidad respecto a las que se encuentran más cerca del receptor, las cuales se agolpan de forma clara entorno a dicha línea y manteniendo valores elevados de parámetro K con respecto a las medidas más lejanas. A continuación, se va a realizar el análisis del parámetro K en función del ancho de banda empleado.

5.3.2. Parámetro K en función del ancho de banda

El análisis de las figuras anteriores nos ha mostrado diferencias muy pequeñas entre los diferentes anchos de banda empleados. Para poder tener una visión más clara de estos datos, se han realizado los cálculos pertinentes para obtener los valores medios del parámetro K en función del ancho de banda empleado. Estos datos han sido realizados desde un ancho de banda de 1 GHz hasta el más grande que tenemos disponible, que es el de 16 GHz. Los resultados se visualizan en la Figura 5.38.

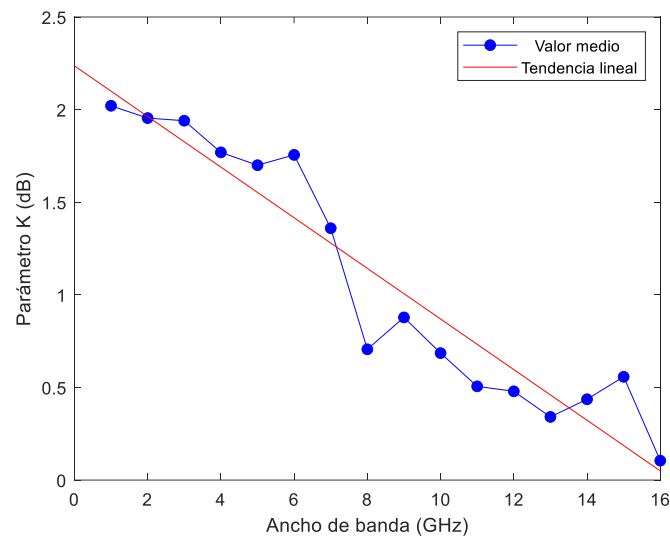


Figura 5.38. Parámetro K en función del ancho de banda. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 5.38 se muestra como a la medida se mantiene constante en los anchos de banda menores y a partir de 4 GHz de ancho de banda comienza a descender el valor medio del parámetro K. A partir de 11 GHz el valor deja de disminuir de forma tan evidente y comienza a estabilizarse e incluso aumentar de nuevo sus valores.

En general esta muestra permite evidenciar que el uso de anchos de banda menores es mejor para el estudio del parámetro K, ya que los valores que se obtienen de media son mejores que los obtenidos para valores de ancho de banda mayores. Esto corrobora lo visto en las Figuras 5.25 a 5.36 con respecto a la Figura 5.37, donde esta última presentaba valores muy dispersos para las distancias más elevadas. Esta dispersión en las distancias más elevadas podría ser la causante de

que en términos generales se disponga de un peor parámetro K en anchos de banda más grandes que en anchos de banda más pequeños.

5.4. Parámetro K y *Delay Spread*

En este último apartado van a ser relacionados tanto el parámetro K como el *Delay Spread*. Para ello se ha hecho uso de las medidas anteriormente expuestas en los apartados anteriores, adaptándolas lo más adecuadamente para poder enfrentarlas siguiendo determinados casos de estudio. Este apartado se va a basar en el estudio del parámetro K en función del *Delay Spread* a igualdad de anchos de banda medidos, así como en función de determinadas frecuencias según la distancia a la que se encuentren el transmisor del receptor. El estudio del parámetro K en función del *Delay Spread* nos ofrece una visión óptima de cuál es la calidad de nuestra señal en el enlace radio.

5.4.1. Parámetro K y *Delay Spread* en función de la distancia

Por último, se va a analizar el desempeño que tienen tanto parámetro K como *Delay Spread* en función de la distancia, empleando para diversas frecuencias y anchos de banda. Este análisis es necesario puesto que nos aportará una idea acerca de cómo se comportan de manera conjunta ambos parámetros a pesar de variar la distancia entre transmisor y receptor.

Para llevar a cabo este análisis, han sido empleados los datos obtenidos en sus respectivos apartados para realizar una correcta medición. Nuevamente, se ha dividido el cálculo en 3 anchos de banda diferentes, como son 2 GHz, 3 GHz y 4 GHz, manteniendo las mismas bandas de medida en todos los casos: 26 GHz, 28 GHz, 33 GHz y 38 GHz. Los resultados obtenidos son los mostrados a continuación en la Figuras 5.39 a 5.50:

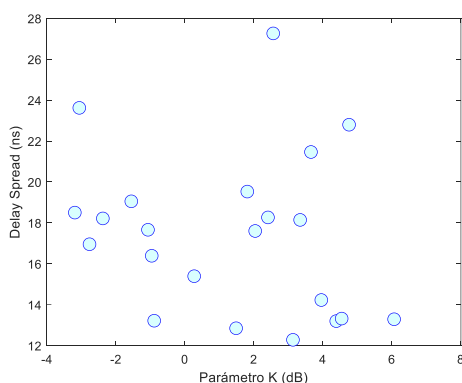


Figura 5.39. Parámetro K y *Delay Spread* a 26 GHz en función de la distancia. BW = 2 GHz. Fuente: elaboración propia.

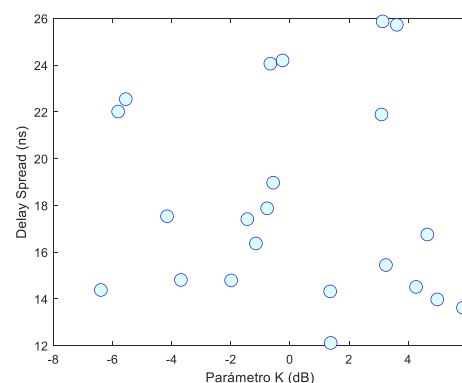


Figura 5.40. Parámetro K y *Delay Spread* a 28 GHz en función de la distancia. BW = 2 GHz. Fuente: elaboración propia.

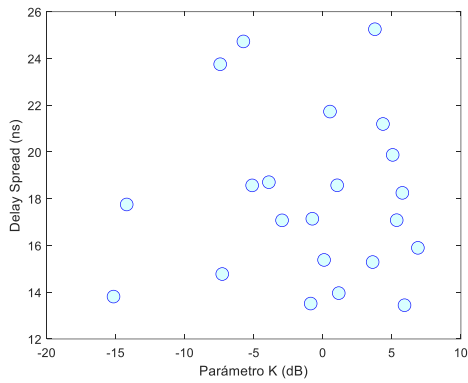


Figura 5.41. Parámetro K y *Delay Spread* a 33 GHz en función de la distancia. BW = 2 GHz. Fuente: elaboración propia.

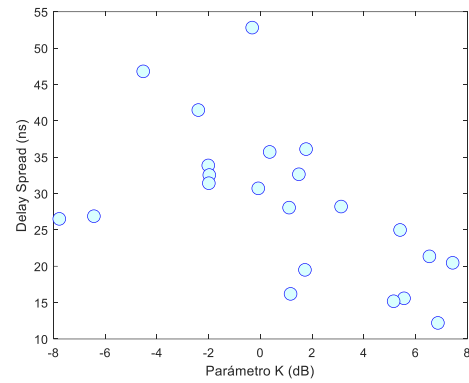


Figura 5.42. Parámetro K y *Delay Spread* a 38 GHz en función de la distancia. BW = 2 GHz. Fuente: elaboración propia.

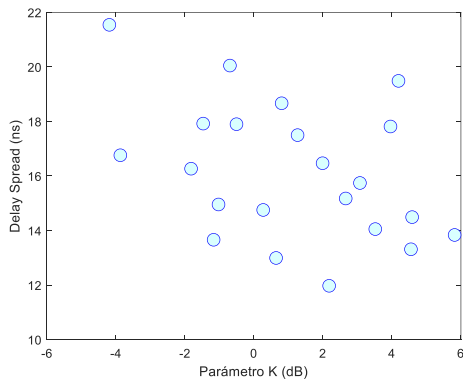


Figura 5.43. Parámetro K y *Delay Spread* a 26 GHz en función de la distancia. BW = 3 GHz. Fuente: elaboración propia.

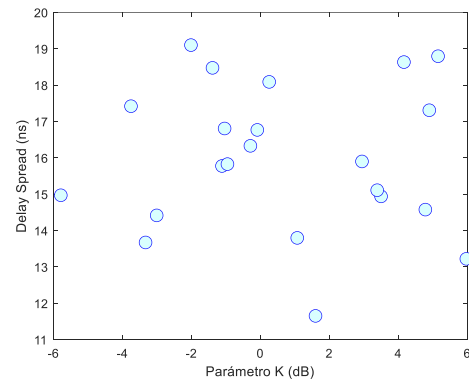


Figura 5.44. Parámetro K y *Delay Spread* a 28 GHz en función de la distancia. BW = 3 GHz. Fuente: elaboración propia.

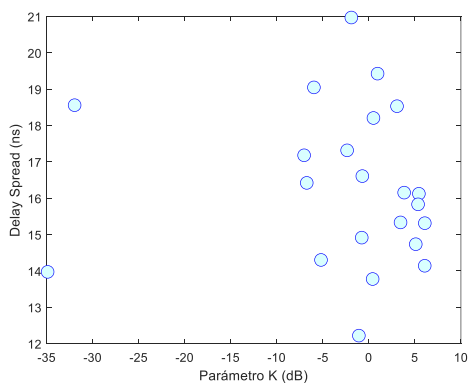


Figura 5.45. Parámetro K y *Delay Spread* a 33 GHz en función de la distancia. BW = 3 GHz. Fuente: elaboración propia.

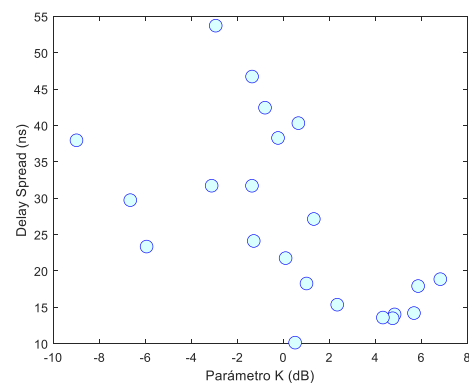


Figura 5.46. Parámetro K y *Delay Spread* a 38 GHz en función de la distancia. BW = 3 GHz. Fuente: elaboración propia.

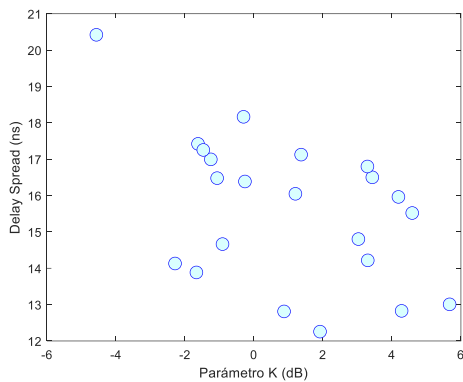


Figura 5.47. Parámetro K y *Delay Spread* a 26 GHz en función de la distancia. BW = 4 GHz. Fuente: elaboración propia.

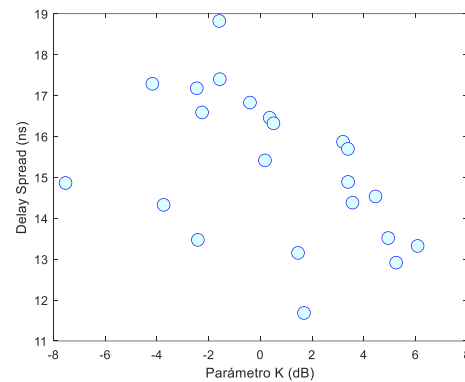


Figura 5.48. Parámetro K y *Delay Spread* a 28 GHz en función de la distancia. BW = 4 GHz. Fuente: elaboración propia.

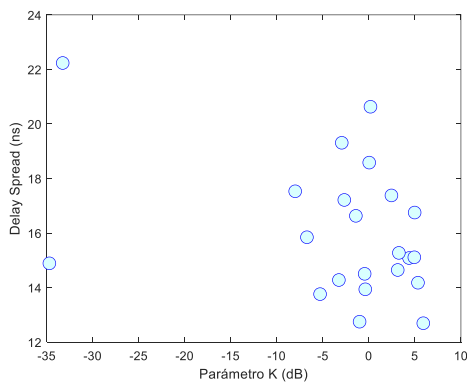


Figura 5.49. Parámetro K y *Delay Spread* a 33 GHz en función de la distancia. BW = 4 GHz. Fuente: elaboración propia.

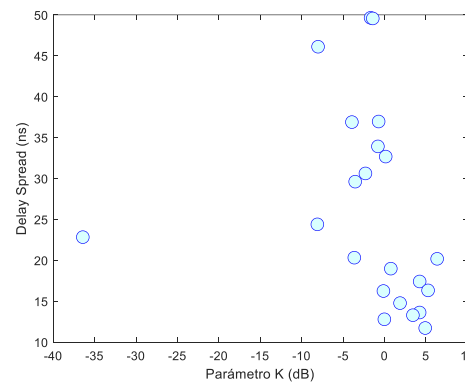


Figura 5.50. Parámetro K y *Delay Spread* a 38 GHz en función de la distancia. BW = 4 GHz. Fuente: elaboración propia.

A partir de 5.39 a 5.42 podemos ver como claramente para frecuencias inferiores los parámetros tanto del *Delay Spread* como para el parámetro K se mantienen en valores mucho más constantes con respecto a las frecuencias más altas. En este contexto, se puede apreciar también el comportamiento que se está teniendo en función de la distancia. Al disponer de frecuencias más bajas, el comportamiento es más estático en todas las distancias medidas, presentando menores perturbaciones, como sí que se presentan en la frecuencia más alta en la Figura 5.42.

Este mismo comportamiento lo visualizamos en las Figuras 5.43 a 5.46, donde claramente tanto en la banda de 26 GHz en la Figura 5.43 como en la banda de 28 GHz en la Figura 5.44 se aprecia que los valores del parámetro K oscilan entre los -5 dB y +5 dB. En estas figuras, también es apreciable que el *Delay Spread* se mantiene en el rango de 12 ns a 18 ns, proporcionando así medidas sin ningún tipo de perturbación respecto al resto.

En cohesión con lo mencionado, en las Figuras 5.47 a 5.50 con un ancho de banda de 4 GHz se hace más notable lo que se acaba de comentar. En la Figura 5.49 podemos apreciar como existen algunas perturbaciones en la medida a 33 GHz en cuanto al parámetro K se refiere, mientras que los valores del *Delay Spread* entran dentro del rango habitual en las frecuencias inferiores. En cuanto a la Figura 5.50, podemos ver que el uso de un mayor ancho de banda, en conjunto al uso de frecuencias elevadas, distorsiona los valores tanto de *Delay Spread* como de parámetro K, mostrándose determinadas perturbaciones en las distancias más lejanas.

5.4.2. Parámetro K y *Delay Spread* en función del ancho de banda

En el apartado 5.2 se ha visto como el *Delay Spread* tiende a descender a medida que se aumenta el ancho de banda medido. Al igual que con el *Delay Spread*, en el apartado 5.3 se observaba como el parámetro K también tendía a disminuir con el ancho de banda empleado. Siendo conscientes de esto, se han construido la Figuras 5.51 a 5.54.

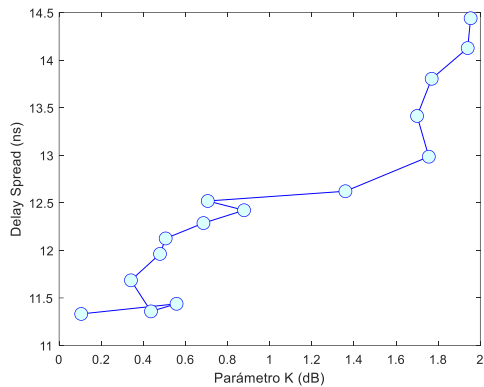


Figura 5.51. *Delay Spread* en función de Parámetro K. Fuente: Elaboración propia.

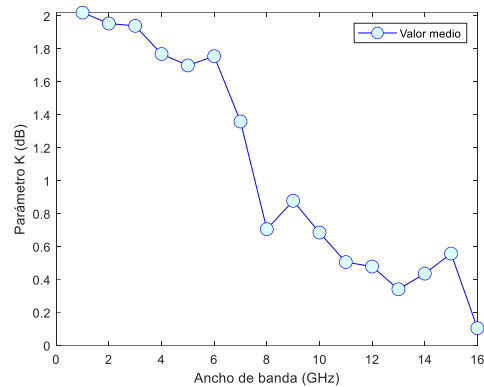


Figura 5.52. Parámetro K en función del ancho de banda. Fuente: Elaboración propia.

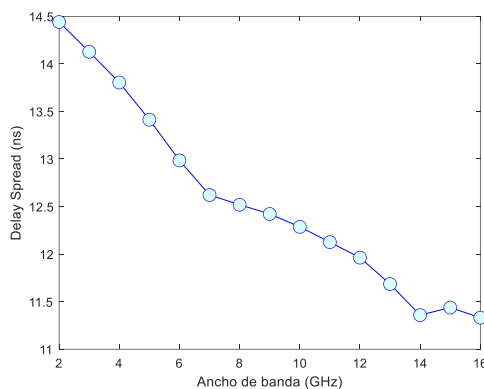


Figura 5.53. *Delay Spread* en función del ancho de banda. Fuente: Elaboración propia.

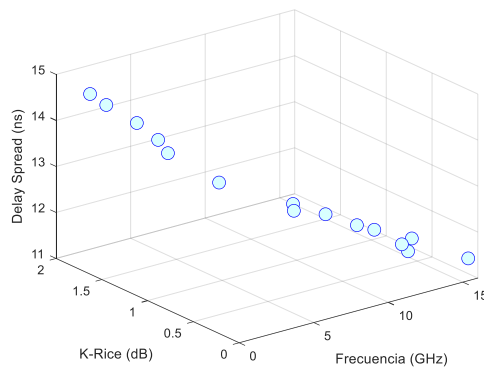


Figura 5.54. *Delay Spread* y Parámetro K en función del ancho de banda. Fuente: elaboración propia.

Analizando los resultados que se han obtenido en la Figura 5.54, podemos comprobar lo mencionado anteriormente, tanto el *Delay Spread* como el parámetro K disminuyen a medida que aumenta el ancho de banda.

Para visualizar de una forma más clara los resultados obtenidos, se ha realizado la tabla 5.10 en la cual se recogen todos los parámetros que se muestran en la Figura 5.54.

Ancho de banda (GHz)	2	3	4	5	6	7	8
<i>Delay Spread</i> (ns)	14.44	14.13	13.8	13.41	12.99	12.62	12.52
Parámetro K (dB)	1.95	1.94	1.77	1.7	1.76	1.36	0.7

Ancho de banda (GHz)	9	10	11	12	13	14	15	16
<i>Delay Spread</i> (ns)	12.42	12.29	12.13	11.96	11.69	11.36	11.44	11.33
Parámetro K (dB)	0.88	0.69	0.51	0.48	0.34	0.44	0.56	0.11

Tabla 5.10 Medidas de Parámetro K y *Delay Spread* en función del ancho de banda. Fuente: elaboración propia.

Al caracterizar los valores mostrados en las Figuras 5.51 a 5.54 se puede apreciar cómo, en efecto, ambos parámetros disminuyen a medida que aumente el ancho de banda medido.

Al ser ambos parámetros una medida de calidad de la señal de la que dispone cabría destacar el uso de ancho de banda más pequeños respecto a los más grandes. Tal y como se ha observado, anchos de banda pequeños aportan una mayor calidad al tener un parámetro K elevado, al igual que nos proporcionan un *Delay Spread* algo más elevado, lo que permite que de esta forma la diferencia en el retardo entre la componente directa y las componentes difusas sea algo más elevada, evitando así que se puedan producir contribuciones entre la señal directa y el resto de las componentes.

Capítulo 6 Conclusiones y líneas futuras

6.1. Conclusiones

En este TFG se han estudiado los efectos de la dispersión temporal y cómo se comporta el parámetro K de la FDP *Rice* en un entorno *indoor*. El análisis ha sido llevado a cabo en la banda de 24 GHz a 40 GHz, puesto que el objetivo era comparar el comportamiento en las bandas de 26 GHz, 28 GHz, 33 GHz y 38 GHz, ya que pertenecen al conjunto que han sido aceptadas por la ITU-R en el despliegue de redes 5G.

Puesto que todas las posiciones que se tuvieron en cuenta a la hora de colocar el transmisor respecto del receptor contaban con visión directa, los PDP obtenidos muestran una primera componente principal, acompañada de componentes secundarias con diferentes retardos temporales. A partir de estos PDP medidos para cada una de las 49 posiciones en las que se posicionaba el receptor sobre el array que lo contenía, se han obtenido los *Delay Spread* correspondientes.

Los *Delay Spread* han sido analizados tanto en función de la distancia entre transmisor y receptor, como en función del ancho de banda y en función del TH. Respecto a la distancia, se ha podido observar de manera clara que para todas las bandas de frecuencia que se han tenido en cuenta la tendencia ha sido la misma, siendo esta una tendencia lineal ascendente. Las diferencias entre las bandas de frecuencias se han observado en que a medida que aumenta la frecuencia, los valores de *Delay Spread* también tienden a ser más grandes que cuando se emplean frecuencias menores. En cuanto al análisis en función del ancho de banda ha demostrado unas diferencias menores a los 2 ns entre el ancho de banda más grande que se podía considerar (16 GHz) y el más pequeño que podíamos tener en consideración sin *aliasing* (2 GHz). Por ello, se ha demostrado que a medida que se aumenta el ancho de banda existe una tendencia descendente del *Delay Spread*. Por último, un análisis del *Delay Spread* en función del TH, nos muestra como a partir de 40 o 50 dB de TH todas las frecuencias han estabilizado sus valores de *Delay Spread*. Pese a ello, a medida que aumenta la frecuencia, esta estabilización se provoca con valores de *Delay Spread* de 5 a 10 ns superiores respecto a la anterior frecuencia medida.

En cuanto al parámetro K , el análisis se ha basado en un estudio en función de la distancia entre transmisor y receptor, así como el ancho de banda empleado. Se ha observado como a medida que aumenta la distancia, el parámetro K disminuye y a medida que se aumenta la frecuencia, los valores de parámetro K tienden a ser inferiores respecto a los de frecuencias más bajas. El uso de diferentes anchos de banda ha mostrado una tendencia descendente en los valores de parámetro K , por lo que en resumen sería más recomendable el uso de anchos de banda menores y frecuencias más bajas según los datos aportados por el parámetro K .

En cuanto a la comparativa entre *Delay Spread* y parámetro K , se ha comprobado que para anchos de banda menores, se obtienen valores más altos tanto de *Delay Spread* como de parámetro

K, tendiendo a disminuir ambos a medida que aumenta el ancho de banda. En cambio, a medida que aumenta la distancia se ha analizado como el *Delay Spread* aumenta a medida que disminuye el parámetro K. El uso de diferentes anchos de banda en estas circunstancias ha dado lugar a tener datos ligeramente más concentrados en lo que a *Delay Spread* corresponde, no suponiendo variaciones drásticas entre diferentes anchos de banda.

6.2. Líneas futuras

Para finalizar, cabría mencionar que resultaría de interés el análisis de estas medidas en entornos *indoor* menos dispersivos, que quizá se ajusten más adecuadamente a otros entornos más habituales de propagación radio, así como la posibilidad de realizar estas medidas en un entorno *outdoor*, tal y como se realiza en [3].

Otra vía de estudio sería la de forzar que no exista una visión directa entre transmisor y receptor, pudiendo ver qué efectos provoca esto a nivel de dispersión temporal así como en el parámetro K cuando la componente principal no fuera la primera que llegase al receptor.

Capítulo 7 Referencias

- [1] T. Xu y I. Darwazeh, "Non-Orthogonal Narrowband Internet of Things: A Design for Saving Bandwidth and Doubling the Number of Connected Devices," en *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 3, pp. 2120-2129, Junio 2018, doi: 10.1109/JIOT.2018.2825098.
- [2] J. Restrepo. (Septiembre 2019). 5G: Spectrum International Regulatory Framework. [Online]. Consultado: 7 de julio de 2023. Disponible: https://www.itu.int/en/ITU-D/Regulatory-Market/Documents/Events2019/Togo/5G-Ws/Ses1Joaquin_5G%20SpectrumRegulation.pdf
- [3] P. Tang, J. Zhang, A. F. Molisch, P. J. Smith, M. Shafi y L. Tian, "Estimation of the K-Factor for Temporal Fading From Single-Snapshot Wideband Measurements," en *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 1, pp. 49-63, Ene. 2019, doi: 10.1109/TVT.2018.2878352.
- [4] A. F. Molish, "Wireless Communications", 2ª ed. Reino Unido: John Wiley & Sons Ltd, 2011.
- [5] F. J. Andani, L. Rubio Arjona, B. Bernardo-Clemente, V. M. Rodrigo Peñarrocha, J. Reig, J. R. Pérez, R. P. Torres, L. Valle, "Modelado del scattering difuso en la banda de milimétricas" en XXXVI Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI 2021), Online, 2021, pp: 1-4.
- [6] Y. A. Kosevich, "Multichannel propagation and scattering of phonons and photons in low-dimension nanostructures", *Phys--Usp*, vol. 51, no. 8, pp. 848-859, Agosto 2008, doi: 10.1070/PU2008v051n08ABEH006597.
- [7] S. Salous, "Radio Propagation Measurement and Channel Modelling", 1ª ed. Reino Unido: John Wiley & Sons Ltd, 2013.
- [8] "Propagación radioeléctrica, modelos y caracterización del canal radio", L. Rubio Arjona, Departamento de Comunicaciones, Universitat Politècnica de València, 2022.

- [9] P. Bello, "Characterization of Randomly Time-Variant Linear Channels," en IEEE Transactions on Communications Systems, vol. 11, no. 4, pp. 360-393, Diciembre 1963, doi: 10.1109/TCOM.1963.1088793.
- [10] C. L. Holloway, M. G. Cotton y P. McKenna, "A model for predicting the power delay profile characteristics inside a room," en IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 48, no. 4, pp. 1110-1120, Julio 1999, doi: 10.1109/25.775360.
- [11] A. Al-Kinani, C. -X. Wang, H. Haas y Y. Yang, "Characterization and Modeling of Visible Light Communication Channels," 2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Nanjing, China, 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/VTCSpring.2016.7504160.
- [12] A. Doukas y G. Kalivas, "Rician K Factor Estimation for Wireless Communication Systems," 2006 International Conference on Wireless and Mobile Communications (ICWMC'06), Bucharest, Romania, 2006, pp. 69-69, doi: 10.1109/ICWMC.2006.81.
- [13] C. Catalá, "Diseño e Implementación Eficiente de una Sonda de Medida para la Caracterización del Canal Radio en Milimétricas", Trabajo Fin de Máster, UPV, Valencia, 2021.
- [14] R. Cervera, "Caracterización experimental de la dispersión temporal y angular del canal radio en un escenario de oficina", Trabajo Fin de Grado, UPV, Valencia, 2020.