

ANÁLISIS DEL CANAL DE PROPAGACIÓN EN BANDA ESTRECHA EN LAS BANDAS WLAN CON APLICACIONES ANDROID Y WINDOWS

Antonio Carrasco López

Tutor: Juan Reig Pascual

Cotutor: Lorenzo Rubio Arjona

Trabajo Fin de Grado presentado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universitat Politècnica de València, para la obtención del Título de Graduado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación

Curso 2016-17

Valencia, 4 de julio de 2017

Agradecimientos

A mi familia, especialmente a mis padres y hermana, por darme el soporte y apoyo necesario para llegar hasta aquí.

A mis amigos y compañeros por compartir el día a día.

A mi tutor, D. Juan Reig, por su inestimable ayuda, confianza e implicación en la realización de este Trabajo Fin de Grado.

Gracias a todos.

Resumen

En este Trabajo Fin de Grado se plantea la obtención de un método de estimación de pérdidas en redes Wi-Fi para dispositivos móviles de usuario. La elección de los dispositivos de medida (*smartphones* y ordenador portátil) y el *software* del que hacen uso, fue una tarea clave y necesaria para la posterior realización de medidas, para las cuales se diseñaron diferentes escenarios.

Se ha llevado a cabo un análisis individualizado de las distintas medidas en cada uno de los escenarios, haciendo uso para ello de la herramienta *Matlab*. La representación gráfica de las pérdidas obtenidas a partir de las medidas realizadas, comparándolas con determinados modelos de propagación experimentales, permiten conocer cuál de dichos modelos teóricos se ajusta mejor a la realidad de los escenarios diseñados. Los resultados obtenidos a partir del análisis nos llevarán a desarrollar las conclusiones, posibles aplicaciones y líneas futuras de trabajo que presenta este proyecto.

Resum

Amb aquest Treball Fi de Grau, es planteja l'obtenció d'un mètode d'estimació de pèrdues en xarxes Wi-Fi per a dispositius mòbils d'usuari. L'elecció dels dispositius de mesura (*smartphones* i ordinador portàtil) i el *software* del què fan ús, va ser una tasca clau i necessària per a la posterior realització de mesures, per a les quals es van dissenyar diferents escenaris.

S'ha dut a terme un anàlisi individualitzat de les distintes mesures en cadascun dels escenaris, fent ús per a això de la ferramenta *Matlab*. La representació gràfica de les pèrdues obtingudes a partir de les mesures realitzades, comparant-les amb determinats models de propagació experimentals, permet conèixer quin dels dits models teòrics s'ajusta millor a la realitat dels escenaris dissenyats. Els resultats obtinguts a partir de l'anàlisi ens duran a desenvolupar les conclusions, possibles aplicacions i línies futures de treball que presenten aquest projecte.

Abstract

This final project aims to obtain a loss estimation method on Wi-Fi networks for user devices. The devices (*smartphones* and personal computer) and software election was a key assignment to make measures on different scenarios.

We made an individualized analysis of all measures using *Matlab*. The graphs obtained in comparison with experimental indoor propagation models show the best model to approximate our measures. The results of this analysis help us to develop conclusions, applications and future line of research about this project.

Índice de acrónimos

ACK - Acknowledgement
AP - Access Point
BSS - Business Support Systems
BW - Bandwidth
CFP - Contention Free Period
CNAF - Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias
CP - Contention Period
CSMA/CA - Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CTS - Clear To Send
DCF - Distributed Coordination Function
DFS - Dynamic Frequency Selection
DSSS - Direct Sequence Spread Spectrum
ESS - Extended Service Set
FCS - Frame Check Sequence
FFT - Fast Fourier Transform
IAPP - Interaccess Point Protocol
IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFFT - Inverse Fast Fourier Transform
ISI - Intersymbol Interference
ISM - Industrial, Scientific and Medical
ITU - International Telecommunication Union
LOS - Line Of Sight
LSM - Linear Slope Model
MAC - Media Access Control
MIMO - Multiple Input Multiple Output
MWM - Multi walls multi floors model
NACK - Negative Acknowledgement
NLOS - Non Line Of Sight
OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OSM - One Slope Model
PCF - Point Coordinated Function
PL - Path Loss
QAM - Quadrature Amplitude Modulation
QoS - Quality of Service
QPSK - Quadrature Phase-Shift Keying
RSSI - Received Signal Strength Indicator
RTS - Ready/Request To Send
SISO - Single Input Single Output
SSID - Service Set Identifier
TPC - Transmit Power Control
TPC - Transmitter Power Control
WAVE - Wireless Access in Vehicular Environments
WLAN - Wireless Local Area Network
WMAN - Wireless Metropolitan Area Network
WPAN - Wireless Personal Area Network
WWAN - Wireless Wide Area Network

Índice general

Capítulo 1. Introducción y objetivos.....	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivos	1
1.3 Organización de la memoria	2
Capítulo 2. Metodología.....	3
2.1 Gestión del proyecto.....	3
2.2 Distribución de tareas y diagrama temporal.....	3
Capítulo 3. Redes inalámbricas.....	5
3.1 Introducción a las redes inalámbricas	5
3.2 Tecnologías OFDM y MIMO	6
3.2.1 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)	7
3.2.2 Sistemas MIMO	8
3.3 Wi-Fi	8
3.3.1 Introducción	8
3.3.2 Estándares Wi-Fi.....	8
3.3.2.1 Futuro del estándar 802.11	11
3.3.3 Elementos básicos de una red.....	13
3.3.4 Configuraciones de red.....	13
3.3.5 Capa MAC: Control de acceso al medio	14
3.3.6 Canales Wi-Fi.....	15
3.3.7 Trama IEEE 802.11	16
3.3.8 Características del canal radio.....	17
3.3.9 Balance de potencias	18
Capítulo 4. Caracterización del canal en banda estrecha para entornos indoor .	20
4.1 Canal radio	20
4.2 Caracterización del canal en banda estrecha y banda ancha	21
4.3 Modelos de propagación <i>indoor</i>	22
4.3.1 WINNER II D112 V1.2 Model	22
4.3.2 ITU-R M.2135-1 Model.....	23
4.3.3 ITU-R P.1238-8 Model	23
4.3.4 Cost 231 Models.....	24

Capítulo 5. Configuración de la campaña de medidas.....	27
5.1 Equipos empleados.....	27
5.2 <i>Software</i> para <i>Android</i> y <i>Windows</i>	28
5.3 Proceso de medida.....	32
5.4 Campañas de medida.....	35
5.4.1 Medidas estáticas.....	36
5.4.1.1 Escenario A: Visión directa (LOS)	37
5.4.1.2 Escenario B: Sin visión directa (NLOS)	38
5.4.1.3 Escenario C: Difracción	41
5.4.2 Medidas dinámicas	42
5.4.2.1 Escenario A: Acercamiento.....	42
5.4.2.2 Escenario B: Distanciamiento	45
 Capítulo 6. Análisis de resultados	 48
6.1 Medidas estáticas.....	48
6.1.1 Escenario A: Visión directa (LOS)	48
6.1.2 Escenario B: Sin visión directa (NLOS)	50
6.1.3 Escenario C: Difracción	52
6.2 Medidas dinámicas.....	54
6.2.1 Escenario A: Acercamiento.....	54
6.2.2 Escenario B: Distanciamiento	56
6.2.3 Comparativa de resultados para medidas dinámicas	57
 Capítulo 7. Conclusiones y propuestas de trabajo futuro	 58
7.1 Conclusiones	58
7.2 Propuestas de trabajo futuro	59
 Bibliografía.	 60
 Anexos.....	 62
Anexo I: Código base de <i>Matlab</i> para el análisis de las pérdidas	62

Capítulo 1. Introducción y objetivos

1.1 Introducción

Las redes inalámbricas son ya una herramienta tecnológica implantada con fuerza en nuestra sociedad, una herramienta que está en constante desarrollo con el objetivo de buscar mejores prestaciones y nuevas aplicaciones. Conocer el funcionamiento y los parámetros que rigen el comportamiento de las redes inalámbricas es una tarea clave a la hora de mejorar las características de las mismas.

En Este Trabajo Fin de Grado se plantea la obtención de un método de estimación de pérdidas en redes Wi-Fi para dispositivos móviles de usuario, como pueden ser *smartphones* u ordenadores portátiles. Las redes Wi-Fi pertenecen a la familia de las redes inalámbricas de área local (WLAN, *Wireless Local Area Network*) y son uno de los tipos de redes más extendidas en el mundo, principalmente por su gran versatilidad.

El establecimiento de un método de estimación como el que nos ocupa en este trabajo precisa de la correcta elección de los dispositivos de medida y del *software* del que hacen uso. Además, es necesario plantear una serie de escenarios de medidas que permitan abordar el estudio de la cuestión desde diferentes puntos de vista. El uso de dispositivos de medida cotidianos (*smartphones* y ordenador portátil) y aplicaciones *software* gratuitas, limita la exactitud de nuestro método de estimación, el cual mejoraría con herramientas de medida profesionales.

Para cada uno de los escenarios que se propongan, el comportamiento del enlace será distinto, por lo que analizando dichos comportamientos se irán fijando las bases de nuestro método de estimación deseado. Finalmente, tras valorar los resultados, prestaciones y limitaciones de nuestro método, se estudiarán las posibles aplicaciones que podrían beneficiarse del mismo.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado es obtener una estimación de pérdidas totales en escenarios *indoor* para redes WLAN definidas según el protocolo IEEE 802.11, conocidas normalmente como redes Wi-Fi. Se plantea obtener dicha estimación tanto para dispositivos móviles (*smartphones*) como para ordenadores portátiles, con sistemas operativos *Android* y *Windows* respectivamente.

El cumplimiento de este objetivo principal pasa en primer lugar por la búsqueda y selección de los dispositivos (*hardware*) y aplicaciones (*software*) más adecuados para la realización de las medidas. Una de las condiciones más importantes que se impone al *software*,

tanto para *Android* como para *Windows*, es la de permitir la exportación de datos de las tramas Wi-Fi que se reciban.

Una vez que se hayan seleccionado los dispositivos y las aplicaciones más adecuadas, el siguiente objetivo es la planificación de una campaña de medidas en la que se establezcan diferentes escenarios con el fin de realizar un estudio lo más completo posible del fenómeno en cuestión. Para ello se realizarán pruebas en las zonas comunes del edificio 4P de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Valencia, con visión directa (LOS, *Line Of Sight*) y sin visión directa (NLOS, *Non Line Of Sight*) entre los dispositivos implicados.

Como última tarea se realizaría un análisis detallado de los resultados obtenidos y se compararían con el comportamiento que para el mismo escenario tendrían diferentes modelos de propagación *indoor* teóricos. Dicha comparativa precisa de un estudio previo de los distintos modelos de propagación para escenarios *indoor*.

1.3 Organización de la memoria

La memoria de nuestro trabajo se ha estructurado por capítulos, compuestos a su vez por secciones y subsecciones, todos ellos adecuadamente numerados.

Mientras este primer capítulo se dedica a establecer las cuestiones básicas y presentar una visión esquemática del proyecto a realizar, el segundo capítulo trata sobre la metodología seguida para la realización del trabajo, abordando su gestión y las tareas llevadas a cabo en el mismo.

El tercer capítulo abre la puerta a la parte teórica de nuestro proyecto. En él se tratan aspectos básicos de las redes inalámbricas y se realiza un profundo estudio de las redes Wi-Fi, desarrollando información sobre sus características, estándares o funcionamiento.

Sin dejar de lado aún la teoría, en el capítulo 4 se realizará un estudio de la caracterización del canal radio en banda estrecha, y los fenómenos que en él se dan. Además, se definen detalladamente los modelos de propagación teóricos para escenarios *indoor*, los cuales servirán para ser comparados con nuestro método de estimación obtenido a partir de las medidas reales.

En el capítulo 5 se lleva a cabo un exhaustivo análisis de las campañas de medida realizadas en nuestro proyecto, dando a conocer desde los dispositivos y el *software* empleados, hasta las pautas del proceso de medida, pasando por un detallado estudio de los escenarios propuestos.

El estudio de los resultados de las campañas de medida se realiza en el capítulo 6. Dicho estudio es individual para cada uno de los escenarios planteados en el capítulo anterior.

En el capítulo 7 se detallan las conclusiones y las líneas futuras de nuestro proyecto.

Al final de la memoria se encuentra la bibliografía empleada en el trabajo. Además, en forma de anexo se muestra el código base de *Matlab* empleado para el análisis de los datos y la representación de las rectas de pérdidas.

Capítulo 2. Metodología

2.1 Gestión del proyecto

En este primer apartado de la metodología, acometemos una cuestión fundamental como es la gestión del trabajo.

Como ya se ha adelantado en la introducción del capítulo 1, la parte más importante del proyecto ha sido la búsqueda y selección de las herramientas de medida adecuadas y la realización de las pruebas en los escenarios diseñados. La selección del *software* para los dispositivos precisaba de dos particularidades necesarias, un correcto funcionamiento y sobre todo una capacidad de exportación de datos cómoda para el usuario, en vistas a la alta cantidad de información que se debería procesar. Por otro lado, la ejecución de las medidas se llevó a cabo tras un estudio previo tanto de las posibles zonas de medida, como de los escenarios que en estas zonas se iban a simular.

Una vez se han obtenido los datos de las medidas, la siguiente tarea a realizar es la de procesar dichos datos. Para el análisis de los resultados se usa la herramienta *Matlab*. Gracias a ella podemos simular gráficamente el comportamiento que siguen las pérdidas totales de nuestros enlaces de medida, y las podemos contrastar con la forma que presentan los modelos de *path loss* teóricos para escenarios *indoor*. De esta forma se sabe cuál de los modelos teóricos de propagación se ajusta mejor a la tendencia que siguen nuestras medidas.

Una vez finalizada la tarea del análisis de datos, estaremos en disposición de comentar los resultados de los mismos y poder sacar conclusiones acerca del método de estimación de pérdidas que se quería obtener.

2.2 Distribución de tareas y diagrama temporal

En el apartado anterior se ha expuesto la manera en la que se gestionará el trabajo. Ahora es el momento de tratar su desarrollo, dividido en una serie de tareas, las cuales se enumeran a continuación:

1. Búsqueda de documentación para la redacción del marco teórico del proyecto.
2. Búsqueda de dispositivos de medida y *software* adecuados. Estudio de su funcionamiento.
3. Diseño de los escenarios de medida.
4. Realización de la primera campaña de medidas.

5. Realización de la segunda campaña de medidas.
6. Análisis de datos y obtención de resultados.
7. Redacción de la memoria.
8. Conclusiones y propuestas de trabajo futuro.
9. Realización de la presentación y defensa oral del proyecto.

La Tabla 1 muestra de manera cronológica el tiempo requerido para la realización de las diferentes tareas.

Mes	Semana	Tarea								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Febrero	1 ^a	■	■							
	2 ^a	■	■							
	3 ^a	■	■							
	4 ^a	■	■							
Marzo	1 ^a	■	■							
	2 ^a	■	■							
	3 ^a									
	4 ^a									
Abril	1 ^a	■	■							
	2 ^a	■	■							
	3 ^a									
	4 ^a	■	■							
Mayo	1 ^a	■		■				■		
	2 ^a	■		■				■		
	3 ^a	■			■		■	■		
	4 ^a	■					■	■		
Junio	1 ^a	■					■	■		
	2 ^a					■	■	■		
	3 ^a						■	■	■	
	4 ^a							■	■	■
Julio	1 ^a									■
	2 ^a									
	3 ^a									
	4 ^a									

Tabla 1. Distribución temporal de las tareas del proyecto.

Capítulo 3. Redes inalámbricas

3.1 Introducción a las redes inalámbricas

Las primeras redes locales creadas fueron redes cableadas, aquellas que para establecer una conexión entre el transmisor y el receptor, precisaban de un soporte físico. Dichas redes presentan limitaciones debidas precisamente a éste soporte físico de la conexión (cable de pares, coaxial o fibra óptica), aunque también poseen ventajas como su importante ancho de banda o sus bajas pérdidas. A día de hoy, éste tipo de redes siguen teniendo un uso muy extendido.

Más tarde aparecerían las redes inalámbricas, aquellas que no precisan de un soporte físico para realizar la comunicación, sino que la llevan a cabo mediante ondas electromagnéticas entre transmisores y receptores.

Aunque las tecnologías que hacen posible las comunicaciones inalámbricas existen desde hace muchos años, su implantación comercial no ha sido posible hasta fechas relativamente recientes, en parte, por el auge extraordinario de internet y la producción masiva de dispositivos móviles con capacidades de conexión. Y es que no solo nos quedamos con los teléfonos móviles o los ordenadores portátiles, a día de hoy muchos aparatos cotidianos (coches, electrodomésticos del hogar, etc.) que antes no disponían de esta tecnología, tienen (o tendrán) también capacidad de conexión inalámbrica.

Se entienden las redes inalámbricas como la forma más económica de dar acceso a múltiples usuarios sin disponer de infraestructura previa, aunque también es importante destacar que por ejemplo tienen menor capacidad o seguridad que las redes cableadas.

En la Tabla 2 se destacan algunas ventajas e inconvenientes de las redes inalámbricas con respecto a las redes cableadas.

Ventajas	Inconvenientes
No existen los cables físicos	Más inseguras
Instalación más económica y sencilla	Menor ancho de banda
Conexión de múltiples dispositivos	Mayor complejidad tecnológica
Permite movilidad de los nodos conectados	Atenuación e interferencias
Gran alcance	Espectro radioeléctrico limitado
Posibilidad de crear redes en áreas complicadas	Demanda masiva del espectro radioeléctrico

Tabla 2. Ventajas e inconvenientes de las redes inalámbricas con respecto a las redes cableadas.

Para las redes inalámbricas, que el espectro radioeléctrico sea limitado es un aspecto muy a tener en cuenta. Es un bien escaso y su utilización está regulada para hacer un uso eficiente del mismo de forma que no interfieran unos servicios sobre otros. Por ejemplo, los servicios móviles públicos precisan de licencias, en cambio, servicios privados como las redes inalámbricas (véase redes WLAN que siguen el estándar IEEE 802.11) no precisan de dichas licencias.

Las redes inalámbricas se dividen en los siguientes grupos de acuerdo con su alcance, entendiéndose por alcance aquella máxima distancia a las que pueden situarse los elementos de la comunicación:

- WPAN (*Wireless Personal Area Network*): Redes inalámbricas de área personal. Se denomina red inalámbrica de área personal a aquel tipo de red que tiene un área de cobertura de varios metros (del orden de 10 metros). Su finalidad es comunicar dispositivos personales de uso cotidiano (ordenador, móvil, impresora, etc.). Éste es el caso de la comunicación vía infrarrojos o Bluetooth.
- WLAN (*Wireless Local Area Network*): Redes inalámbricas de área local. Sería el caso de aquellas redes que tienen un alcance de unos cientos de metros y están pensadas para crear un entorno de red local entre ordenadores o terminales situados en un mismo edificio o conjunto de ellos. Entre las tecnologías destacadas estaría Wi-Fi o HiperLAN, aunque ésta última nunca haya conseguido el éxito comercial. En éste trabajo nos centraremos principalmente en las redes Wi-Fi.
- WMAN (*Wireless Metropolitan Area Network*): Redes inalámbricas de área metropolitana. Aquellas redes que tienen una cobertura desde unos cientos de metros hasta varios kilómetros. Su objetivo es el de crear una red con la capacidad de cubrir el área de una ciudad o entorno metropolitano. Protocolos LMDS o WiMAX ofrecen soluciones de este tipo.
- WWAN (*Wireless Wide Area Network*): Redes inalámbricas de amplio alcance. Este tipo de redes proporcionan el mayor alcance, pudiendo cubrir ciudades o países. Hacen uso de redes celulares de comunicaciones móviles para transferir los datos. Podemos destacar las tecnologías GSM, EDGE, UMTS, etc.

3.2 Tecnologías OFDM y MIMO

Las redes inalámbricas sufren una serie de efectos y alteraciones en las señales que transmiten debido precisamente a la forma en la que realizan la comunicación. La propagación de la señal por el espacio libre y la posible existencia de obstáculos en el camino, generan lo que se conoce como propagación multicamino (*multipath*). De éste y otros fenómenos como la interferencia entre símbolos (ISI), se hablará detalladamente en el siguiente capítulo.

Para intentar mitigar o al menos atenuar los efectos de dichos fenómenos y aumentar además la capacidad de transmisión, se han desarrollado novedosas tecnologías como la modulación OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) y los sistemas MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) de múltiples antenas.

Se analiza a continuación las características de éstas tecnologías y los beneficios que aportan a la propagación inalámbrica.

3.2.1 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

La modulación OFDM, basada en la multiplexación por división en frecuencias ortogonales, es la técnica de gestión de frecuencias utilizadas por determinados estándares IEEE 802.11. Fue patentada por *Bell Labs* en 1970.

Consiste en el envío de un conjunto de subportadoras (N en total) a diferente frecuencia. Para ello, se divide la frecuencia portadora en 52 subportadoras solapadas, de las cuales 48 serán destinadas al envío de información y el resto para procesos de sincronización en recepción. De esta forma se entiende el ancho de banda como un conjunto de subcanales que operan en paralelo. La información de cada subportadora se puede modular en QPSK o x-QAM. [1]

Cada una de las subportadoras ortogonales están separadas entre sí Δf , coincidiendo el máximo de cada una de ellas con el nulo del resto de subportadoras. Además, entendiendo el ancho de banda total como $N \cdot \Delta f$, se consigue mayor robustez frente a interferencias en banda estrecha.

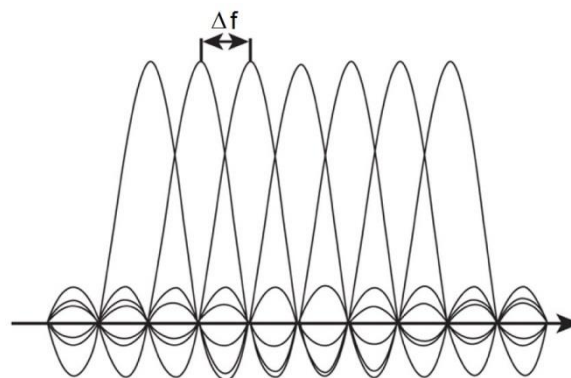


Figura 1. Sucesión de subportadoras ortogonales OFDM. [2]

La técnica OFDM está basada en un proceso matemático llamado FFT (*Fast Fourier Transform*) y su inverso IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*). IFFT convierte una señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, produciendo la señal OFDM. Se suele agregar a cada símbolo un tiempo de guarda con prefijo cíclico que ayuda al receptor a reducir la interferencia entre símbolos (ISI) y a mantener la ortogonalidad de las subportadoras.

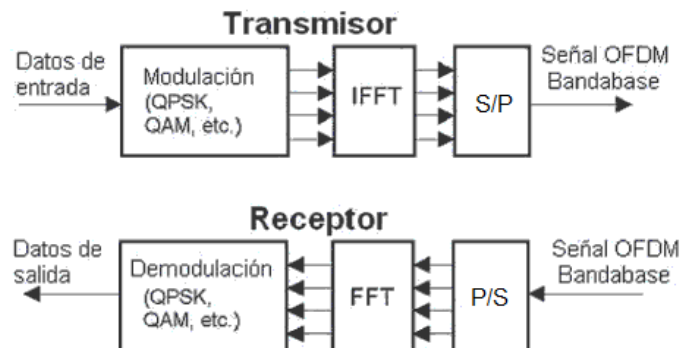


Figura 2. Diagrama de bloques básico de OFDM. [3]

Además de la disminución de la interferencia entre símbolos, se reducen las atenuaciones selectivas en frecuencia y las interferencias de RF. A todo esto hay que añadir que

la tecnología OFDM incrementa la capacidad del radioenlace y consigue un uso muy eficiente del espectro radioeléctrico.

3.2.2 Sistemas MIMO

Otra de las tecnologías que alivia de forma importante los efectos nocivos causados por la propagación *multipath*, serían los sistemas de múltiples antenas MIMO (*Multiple Input Multiple Output*).

Los enlaces radio tradicionales emplean la técnica SISO (*Single Input Single Output*), la cual contempla una antena en transmisión y otra antena en recepción. Entre las ventajas de estos sistemas se puede destacar su simplicidad y bajo coste, aunque plantea importantes limitaciones, como la imposibilidad de recuperar la señal ante un desvanecimiento profundo o el desaprovechamiento de energía radiando en direcciones innecesarias.

Los sistemas MIMO tienen como finalidad multiplicar la capacidad del enlace mediante el uso de múltiples antenas en transmisión y en recepción, creando canales independientes, por los que no necesariamente se tiene que transmitir la misma información.

3.3 Wi-Fi

3.3.1 Introducción

A día de hoy, uno de los factores más importantes para que una tecnología de comunicación pueda expandirse, es la normalización. Inicialmente, cada fabricante establecía unas pautas de comunicación propias para sus equipos, dificultando enormemente la conexión con los dispositivos de otros fabricantes. Mediante la normalización y los protocolos de comunicación, entendiendo por protocolo el conjunto de normas empleadas por dos equipos para realizar una comunicación sin errores, los fabricantes pueden desarrollar sus productos con la certeza de que serán aceptados en el mercado.

Con respecto a las redes WLAN de área local, el organismo que más ha avanzado en el desarrollo de estándares y normas ha sido el IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*). IEEE empezó a trabajar en la estandarización de redes en 1980, creando para ello el grupo de trabajo 802. La norma IEEE 802 se aprobó en 1990, pero no sería hasta 1997 cuando IEEE introdujo un nuevo grupo encargado de las redes de área local inalámbricas (WLAN), el grupo 802.11.

La norma IEEE 802.11 fue creada para sustituir el equivalente a las capas físicas y MAC de la norma 802.3 (*Ethernet*), por tanto, una red local inalámbrica 802.11 es totalmente compatible con las redes locales de cable 802.3.

3.3.2 Estándares Wi-Fi

La asociación WECA (*Wireless Ethernet Compatibility Alliance*) creada en 1999, que pasaría a ser *Wi-Fi Alliance* en 2003, creó la marca Wi-Fi bajo la cual certifica la conectividad entre diferentes dispositivos inalámbricos.

Entre las características más importantes de Wi-Fi, podemos destacar que se ha convertido en el estándar de hecho para la conectividad inalámbrica en el entorno del hogar o lugares públicos, con una cobertura al aire libre de hasta 300 metros. Además, hace uso de bandas sin licencia en las que coexisten multitud de señales y es un sistema *Half-Duplex*, en el que básicamente transmisor y receptor hacen uso del mismo canal.

Como se ha dicho anteriormente, la tecnología Wi-Fi se ha convertido en el estándar de hecho para las redes WLAN. Ésta realidad se puede apreciar con claridad en la Figura 3. La imagen presenta, por años, un gráfico de barras que hace referencia al número total de dispositivos de usuario dotados con tecnología Wi-Fi y una gráfica lineal que muestra el porcentaje de penetración de los dispositivos de usuario en la población. Se aprecia con claridad como la mayoría de dispositivos del mercado poseen tecnología Wi-Fi.

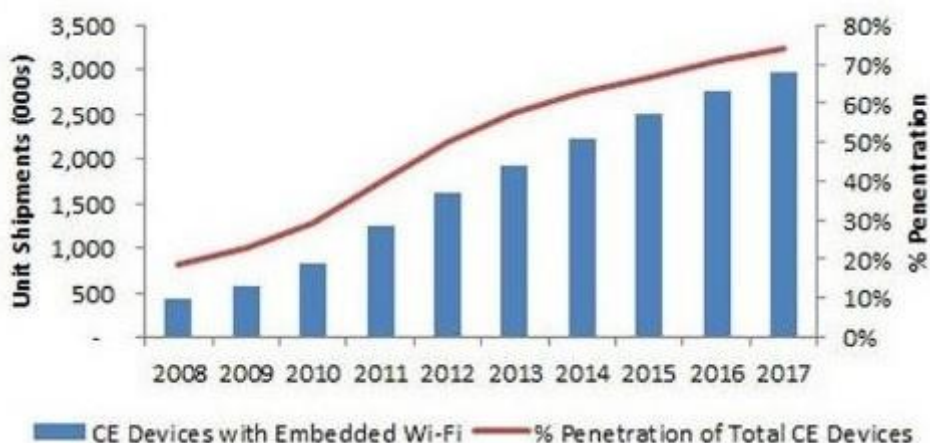


Figura 3. Número total de dispositivos Wi-Fi de usuario VS porcentaje de penetración de dispositivos de usuario. [4]

Wi-Fi, como sistema de comunicación inalámbrico que es, presenta una serie de ventajas e inconvenientes muy similares a los vistos en la Tabla 2 para las redes inalámbricas, los cuales se analizan de forma básica en la Tabla 3.

Ventajas	Inconvenientes
Capacidad de conexión en diferentes puntos dentro de la cobertura	Menor velocidad que las conexiones cableadas
Permite el acceso a múltiples usuarios	Interferencia con redes próximas debido a la proliferación de las redes Wi-Fi
Marca Wi-Fi asegura compatibilidad entre dispositivos	Problemas con la seguridad
	Wi-Fi no es compatible con otro tipo de redes inalámbricas

Tabla 3. Ventajas e inconvenientes básicos de las redes Wi-Fi.

A continuación se van a analizar las características de los estándares principales y más comunes de la familia IEEE 802.11 (estándar Wi-Fi), desde los primeros hasta los que se desarrollarán en un futuro próximo, pasando por los empleados a día de hoy.

- IEEE 802.11 (estándar Wi-Fi): la versión original fue publicada en 1997 y hacía uso de infrarrojos para realizar la transmisión. No gozó de gran éxito y pronto aparecieron nuevas normas en la banda de 2,4 GHz. Llegó a trabajar a velocidades de 1 y 2 Mbps con CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) como mecanismo de acceso.

En el año 1999 se desarrollarían dos de los estándares más extendidos de la familia IEEE 802.11 como son IEEE 802.11a y IEEE 802.11b.

- IEEE 802.11a (Wi-Fi 5): versión de 802.11 en la banda de 5 GHz con codificación OFDM. Alcanza una velocidad nominal de hasta 54 Mbps. El operar en una banda de mayor frecuencia, que la usada por ejemplo en 802.11b (2,4 GHz), conlleva ventajas e inconvenientes. La banda de 5 GHz, recientemente habilitada, sufre niveles menores de congestión y por tanto muy pocas interferencias, sin embargo, ésta frecuencia proporciona menor alcance al presentar mayor atenuación.
- IEEE 802.11b: más conocido como “estándar Wi-Fi”, dada su amplia implantación internacional por la universalidad de la banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) a 2,4 GHz en la que opera. Llega a una tasa de hasta 11 Mbps. Utiliza una modulación lineal compleja DSSS y CSMA/CA como protocolo de acceso al medio.
- IEEE 802.11g: llegaría en 2003 como la evolución del estándar IEEE 802.11b, con el que guarda compatibilidad. Surgió con la idea de aumentar la velocidad sin renunciar a las ventajas de la banda de los 2,4 GHz. Permite transmitir datos a 54 Mbps, similar a la del protocolo IEEE 802.11a. También como IEEE 802.11a, hace uso de la codificación OFDM.
- IEEE 802.11h: grupo de trabajo del IEEE 802.11 que salió a la luz también en 2003 y que buscó una mejora general del estándar 802.11a, en lo referente a la gestión del espectro radioeléctrico en la banda de 5 GHz. Concretamente, en la selección dinámica de canal y el control de la potencia de transmisión.
La selección dinámica del canal busca un uso eficiente de los canales de transmisión, para ello se desarrolló DFS (*Dynamic Frequency Selection*). Por otro lado, TPC (*Transmitter Power Control*) se encarga de limitar la potencia radiada en los canales. Se añadió la potencia de transmisión como un nuevo parámetro en las tramas Wi-Fi.
- IEEE 802.11n (Wi-Fi N): actualización de la familia 802.11 desarrollada en 2003, aunque no sería hasta 2009 cuando se aprobara. Introdujo importantes mejoras con las que consiguió pasar de 300 Mbps a 600 Mbps de velocidad.
Dicha mejoría se produjo fruto de novedades como la implementación de sistemas MIMO de hasta 4 canales independientes, la capacidad de ampliación del BW por la unión de dos canales no solapados (*Channel Bonding*) o la disminución del tiempo de guardia en la modulación OFDM.
Asimismo, IEEE 802.11n es capaz de trabajar en las bandas de 2,4 y 5 GHz y puede interactuar con equipos 802.11a, 802.11b o 802.11g, ya que es compatible con versiones anteriores.

Además de los más importantes, comentados anteriormente, se pueden apreciar en la Tabla 4 a modo de resumen el resto de grupos de trabajo de la familia 802.11 y la mejora que implementaban.

Estándar	Grupo de trabajo
802.11	Especificaciones de la capa física y MAC de las redes WLAN a 2,4 GHz
802.11a	Especificaciones de la capa física y MAC de las redes WLAN a 5 GHz
802.11b	Especificaciones de la capa física y MAC de las redes WLAN con rango de velocidades entre 5,5-11 Mbps a 2,4 GHz
802.11c	Pasarela MAC entre redes (<i>Bridging 802.11</i>)
802.11d	Itinerancia internacional permitiendo el uso internacional de las redes 802.11 locales
802.11e	Calidad de servicio para aplicaciones avanzadas (QoS) de voz, video, etc.
802.11f	Interacción entre puntos de acceso (AP, <i>Access Point</i>) de distintos fabricantes (IAPP, <i>Interaccess Point Protocol</i>)
802.11g	Especificaciones para redes WLAN de alta velocidad (54 Mbps) a 2,4 GHz
802.11h	Mejoras para la selección dinámica del canal y control de potencia de transmisión
802.11i	Mejoras en seguridad y autenticación
802.11j	Equivalente a 802.11h para la legislación japonesa
802.11k	Capacidad de medición de recursos radio por parte de los elementos de la red para mejorar su gestión
802.11m	Mantenimiento y correcciones en la familia 802.11
802.11n	Especificaciones para redes WLAN de altas velocidades a 2,4 y 5 GHz
802.11p	Intercambio de datos entre vehículos e infraestructura vial (WAVE, <i>Wireless Access in Vehicular Environments</i>)
802.11r	Rápida identificación de usuarios en nuevos puntos de acceso (<i>Fast Roaming</i>)
802.11s	Intención de crear redes malladas globales con dispositivos de bajo coste y <i>software</i> libre
802.11v	Gestión centralizada. Capacidad de configuración de los dispositivos de usuario a distancia.

Tabla 4. Estándares de la familia 802.11. [5][6]

3.3.2.1 Futuro del estándar 802.11

Los diferentes grupos de trabajo del IEEE 802.11 siguen trabajando en estándares más modernos que puedan proporcionar al usuario mayores velocidades binarias y mejor cobertura. El objetivo es seguir investigando tecnologías como MIMO, ampliar los anchos de banda o buscar modulaciones más eficientes, con vistas a conseguir velocidades de transmisión de hasta Gbps.

En este apartado se analizarán las prestaciones y el estado en el que se encuentran los nuevos estándares más destacados de la familia IEEE 802.11, estando algunos de ellos aún en procesos de desarrollo. [7]

- IEEE 802.11ad: uno de los nuevos estándares de la familia 802.11, que a diferencia de todos los anteriores, hace uso de la banda de los 60 GHz. Fue publicado en diciembre de 2012 y se ha llegado a obtener una tasa de hasta 7 Gbps. El trabajar en un valor de frecuencia tan alto trae consigo unas características de propagación muy distintas con respecto a las vistas hasta el momento con las bandas de 2,4 y 5 GHz. Su alcance por ejemplo, ha quedado muy limitado, del orden de 5 a 10 metros.
- IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5G): mejora de IEEE 802.11n aprobada en 2013. Trabaja en la banda de los 5 GHz y trae consigo importantes mejoras en cuanto al rendimiento y la velocidad, consiguiéndose una tasa máxima de hasta 1 Gbps por antena. Presenta nuevos anchos de banda de 80 y 160 MHz y hace uso de la tecnología MIMO con hasta 8 flujos (*streams*).
- IEEE 802.11af (Super Wi-Fi): estándar para redes inalámbricas de área local aprobado en 2014, aunque no está considerado por *WiFi Alliance* como una tecnología Wi-Fi. Su funcionamiento se basa en el uso de bandas libres del espectro de televisión para dar acceso inalámbrico. Presenta un importante alcance debido a las menores pérdidas de las bandas de TV.
- IEEE 802.11ah: aprobado en 2016. Sistema que opera en bandas por debajo de 1 GHz orientado a distintos propósitos, entre los que se encuentra la comunicación entre sensores a gran escala o el acceso Wi-Fi al aire libre en amplios espacios. La banda de frecuencias de la que hace uso (< 1GHz) le permite importantes alcances de cobertura con respecto a las bandas de 2,4, 5 y 60 GHz estudiadas hasta el momento.
- IEEE 802.11ax: estándar aún en desarrollo. Su aprobación se prevé entre los años 2018-2019 y se plantea como la evolución de IEEE 802.11ac, con tasas de rendimiento y velocidad superiores al mismo.
- IEEE 802.11ay: durante el año 2017 se han publicado versiones de prueba, aunque el protocolo sigue estando oficialmente en desarrollo. Tiene como finalidad importantes mejoras en la banda de los 60 GHz, por lo que sería una revisión del estándar IEEE 802.11ad. Las previsiones auguran velocidades de transmisión de entre 20-40 Gbps.

En la Figura 4 se muestra una estimación del número de dispositivos que harán uso de los diferentes estándares IEEE 802.11 en el futuro. Claramente la tendencia nos lleva hacia un uso preferente de los nuevos estándares IEEE 802.11 en detrimento de protocolos clásicos.

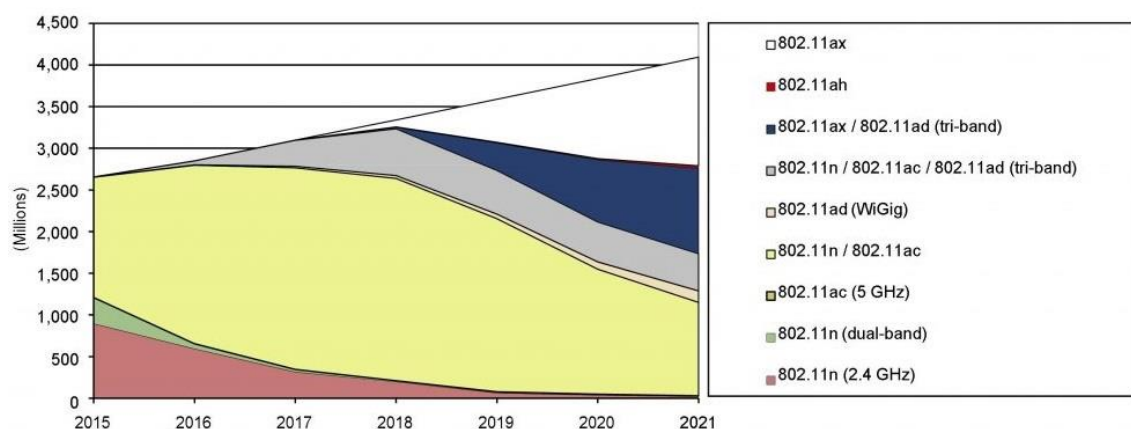


Figura 4. Comparativa de la penetración que tendrán los futuros estándares IEEE 802.11. [8]

3.3.3 Elementos básicos de una red

El diseño de una red inalámbrica requiere conocer previamente los elementos básicos de la misma. En la realidad no existe una red inalámbrica modelo, pues cada red presenta unas determinadas características y busca cubrir unas necesidades diferentes, sin embargo, existen elementos comunes a todas ellas que es imprescindible conocer. Estos elementos indispensables son el punto de acceso (AP, *Access Point*) y los adaptadores inalámbricos de red. [9]

- Punto de acceso (AP, *Access Point*): se define como el centro de las comunicaciones de la mayoría de las configuraciones de red inalámbricas, de las cuales, revisaremos las más importantes en el apartado siguientes de este trabajo. Los puntos de acceso, en lo sucesivo AP, reciben información mediante ondas de radiofrecuencia de diferentes dispositivos y la retransmite al servidor de la red mediante cable, o viceversa, es por tanto que sirven como medio de interconexión con la red fija e Internet.
- Adaptadores inalámbricos de red: estaciones de radio que se comunican con otros adaptadores u otros AP dependiendo de la configuración de red. Dichos equipos cumplen con el estándar 802.11, el cual como ya sabemos, permite la conexión a redes inalámbricas. Ya a día de hoy, la mayoría de aparatos inalámbricos y ordenadores llevan integrado un adaptador inalámbrico.

3.3.4 Configuraciones de red

Dentro de las redes Wi-Fi podemos distinguir dos modos de configuraciones de red básicas: modo *ad-hoc* o modo infraestructura.

- Modo *ad-hoc*: este tipo de redes no precisan de una infraestructura previa ni de ningún AP para conectarse a la red. El encaminamiento se produce por el reenvío de datos entre los nodos de la red, los cuales se entienden como dispositivos Wi-Fi con adaptadores inalámbricos de red integrados.
Como principal inconveniente destaca el número de saltos entre nodos que debe realizar la información para llegar a su destino, ya que para un número grande de saltos, el tiempo de llegada de la información se incrementa y la posibilidad de corromper la misma también aumenta.
Este tipo de red resulta especialmente práctico para comunicaciones temporales entre dos terminales por su facilidad de configuración.
- Modo infraestructura: a diferencia de las redes *ad-hoc*, el modo infraestructura sí precisa de un AP para conectarse a la red, además de los distintos dispositivos Wi-Fi dotados con adaptadores inalámbricos de red. Cada uno de estos dispositivos se conocen como estaciones (EST) y junto a AP conforman lo que se conoce como conjunto de servicio básico (BSS). La unión de varios BSS da como resultado un conjunto de servicio extendido (ESS).
La estructura que presenta este modo está orientada a redes permanentes.

En la Figura 5 se representa de forma básica la estructura que presenta cada uno de los modos de configuración de red.

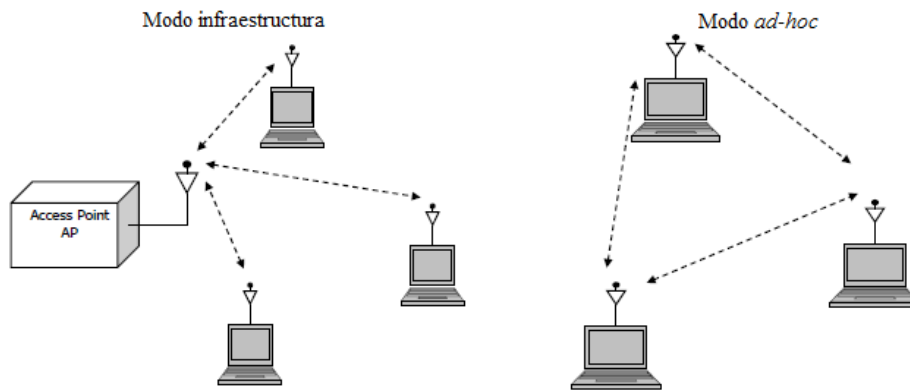


Figura 5. Estructura básica de los modos infraestructura y *ad-hoc*. [10]

3.3.5 Capa MAC: Control de acceso al medio

Mediante la capa MAC (*Media Access Control*), el estándar 802.11 define una serie de funciones propias de las redes inalámbricas referentes al control de acceso al medio. De forma general, la capa MAC gestiona y mantiene las comunicaciones entre dispositivos 802.11, controlando el acceso al canal compartido.

El estándar 802.11 define dos técnicas de acceso al medio: función de coordinación distribuida (DCF, *Distributed Coordination Function*) y función de coordinación de punto (PCF, *Point Coordinated Function*).

A. *Distributed Coordination Function* (DCF).

DCF es obligatorio en el estándar 802.11 para todos los dispositivos reconocidos por *Wi-Fi Alliance*, por lo que se entiende como el protocolo más común en redes Wi-Fi. Basa su funcionamiento en la técnica de acceso CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) con intercambio RTS/CTS opcional y acuse de recibo explícito. Puede utilizarse en redes con o sin infraestructura.

CSMA/CA se define como un protocolo de acceso al medio que permite la utilización de un mismo medio de transmisión para múltiples estaciones. Cuando una de estas estaciones quiere transmitir, primero escucha al medio y transmite siempre y cuando éste esté libre, en caso contrario, se esperará un tiempo aleatorio (tiempo de contención) para volver a intentarlo.

El problema del nodo oculto se da en una red inalámbrica cuando dos o más estaciones están asociadas al mismo AP pero no pueden verse entre ellas, de forma que transmiten simultáneamente originando problemas para el resto de la red. Con el mecanismo RTS/CTS las estaciones notifican a AP su intención de transmitir, y de esta forma se soluciona el problema del nodo oculto.

El proceso da comienzo cuando se envía, por parte del dispositivo interesado en transmitir, una trama de solicitud de transmisión RTS (*Ready/Request To Send*) en la que incluye información del origen, destino y tamaño de la trama que se quiere enviar. En el caso de que la trama RTS llegue correctamente a su destino, éste contestará si está ocupado (RxBUSY) o bien si está listo para iniciar la comunicación (CTS, *Clear To Send*). Si una estación recibe un mensaje RTS pero no recibe respuesta (CTS o RxBUSY), se sabe que esta estación es un nodo expuesto y puede comunicarse con otros nodos. En caso de no recibir RTS pero sí CTS, estaremos ante un nodo oculto que deberá esperar un intervalo de tiempo correspondiente al tamaño de trama que se desea enviar.

Cuando se envía finalmente el mensaje, el emisor espera un acuse de recibo (ACK, *acknowledgement*) por parte del receptor si el mensaje ha llegado correctamente, o por el contrario, una notificación de recepción errónea (NACK, *negative acknowledgement*). Si se recibe NACK o no se recibe nada, el emisor reenviará el mensaje. Existe un límite de reenvíos.

B. *Point Coordinated Function (PCF)*.

Otra técnica de coordinación de acceso definida por IEEE 802.11 es la conocida como PCF, aunque sólo se puede utilizar en redes con infraestructura. Es una técnica opcional, no como DCF que era obligatoria, y no es un requisito exigido por *Wi-Fi Alliance* por lo que está muy poco extendida.

PCF distingue periodos de tiempo con conflicto (CP, *Contention Period*) y libres de conflictos (CFP, *Contention Free Period*). Durante CP se utiliza la técnica DCF explicada previamente, sin embargo, en los CFP se define como punto de coordinación de acceso el AP asociado a la estación. Se entiende esta forma de acceso al medio como una forma de control centralizada.

3.3.6 *Canales Wi-Fi*

Como ya se ha comentado en anteriores apartados, la tecnología Wi-Fi tradicional hace uso de dos bandas de funcionamiento, a 2,4 y 5 GHz. Mientras que estándares como IEEE 802.11b o IEEE 802.11g hacen uso de la primera de las banda, la segunda es empleada por estándares como el IEEE 802.11a. Recordemos que también existen versiones como IEEE 802.11n que puede funcionar en ambas bandas.

Cada una de estas bandas están divididas a su vez en canales no totalmente independientes (por el solape que presentan) para el uso de equipos Wi-Fi, los cuales se pueden configurar dependiendo de las necesidades del usuario.

- Banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) a 2,4 GHz: se definieron inicialmente 14 canales con un ancho de 22 MHz cada uno y una separación entre ellos de 5 MHz, lo que produce un importante solapamiento como se puede apreciar en la Figura 6.

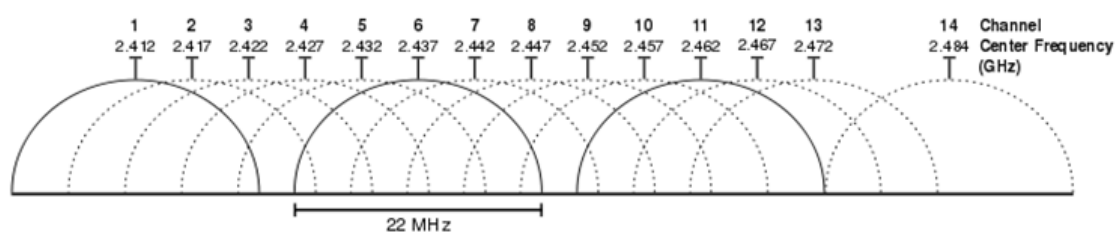


Figura 6. Distribución de canales en la banda de 2,4 GHz. [11]

Dependiendo del país o región se aplican distintas normativas sobre el uso de los canales, en España por ejemplo, se emplean los canales 1-13. Se han venido utilizando de forma tradicional los canales 1, 6 y 11 por no presentar solapamiento, aunque está demostrado que el uso de los canales 1, 5, 9 y 13 no afecta al correcto funcionamiento de la red. [12]

- Banda a 5 GHz: en España, como en el resto de Europa, se hace uso de los canales 36-64 y 100-140. Parámetros como la frecuencia central o la numeración de cada uno de estos canales han quedado resumidos en la Tabla 5.

Canal	Frecuencia (MHz)	Canal	Frecuencia (MHz)
36	5180	108	5540
40	5200	112	5560
44	5220	116	5580
48	5240	120	5600
52	5260	124	5620
56	5280	128	5640
60	5300	132	5660
64	5320	136	5680
100	5500	140	5700
104	5520		

Tabla 5. Distribución de canales en la banda de 5 GHz

3.3.7 Trama IEEE 802.11

La unidad de transmisión a nivel de MAC (*Media Access Control*) es la trama, la cual contiene una serie de parámetros que regulan el tránsito adecuadamente por la red. En función de dichos parámetros la trama busca diversos objetivos y puede transportar distintos tipos de información. Las Figuras 7 y 8 ilustran el formato de la trama general y el formato del campo *Frame Control*, respectivamente.

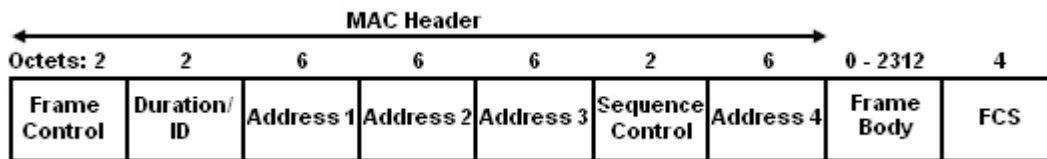


Figura 7. Formato general de la trama 802.11. [13]

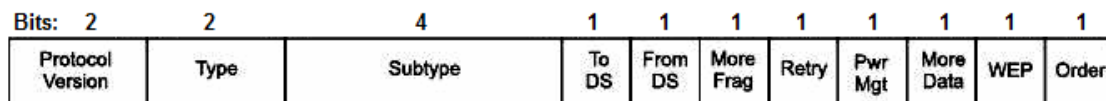


Figura 8. Formato del campo *Frame Control*. [13]

Con respecto a los distintos campos de la trama en su formato general, destaca en primer lugar una cabecera de control (*Frame Control*), seguida de parámetros de duración (*Duration/ID*), direccionamiento (*Address*), datos de longitud variable (*Frame Body*) y finalmente un campo FCS (*Frame Check Sequence*) para la corrección de errores. [5]

Se pueden observar hasta cuatro campos de direccionamiento distintos en la trama general (*Address1*, *Address2*, *Address3* y *Address4*). Los tres primeros indican la dirección MAC destino, MAC origen y MAC del *router* asociado, respectivamente. *Address4* se utiliza para la interconexión de distintos AP en el modo *ad-hoc*.

La cabecera de control está a su vez formada por otra serie de campos ordenados de la forma que se aprecia en la Figura 8. Entre estos campos, destacan tres de forma especial. Por un lado, *Protocol Version* nos da la información del estándar de la familia 802.11 que se está usando. Por otro lado, *Type* y *Subtype* definen el tipo y subtipo de trama, respectivamente, mediante la combinación de bits que figura en la Tabla 6.

Tipo (Type)		Subtipo (Subtype)	
00	Trama de gestión	0000	Association Request
		0001	Association Response
		0010	Reassociation Request
		0011	Reassociation Response
		0100	Probe Request
		0101	Probe Response
		0110-0111	Reserved
		1000	Beacon
		1001	ATIM
		1010	Disassociation
		1011	Authentication
		1100	Deauthentication
		1101	Action
		1110-1111	Reserved
01	Trama de control	0000-0111	Reserved
		1000	Block Ack Request
		1001	Block Ack
		1010	Power Saving -Polling
		1100	RTS
		1101	CTS
		1110	ACK
		1111	CF-end
10	Trama de datos	0	Datos
		...	Otras opciones y QoS

Tabla 6. Tipos y subtipos de tramas MAC 802.11. [14] [15]

Dentro de las tramas de gestión, podemos definir las tramas *beacon* como aquellas tramas periódicas enviadas por AP que anuncian la existencia de una red 802.11. Contienen información sobre los parámetros del conjunto básico de servicios (BSS, *Business Support System*) y de las tramas almacenadas en el buffer del mismo AP. Las estaciones deben recibir estas tramas y para ello es más que conveniente conocer cada cuánto se emiten. Es común un valor de intervalo entre tramas *beacon* de 0,1 segundos. [10]

3.3.8 Características del canal radio

Es importante para nuestro trabajo conocer la forma en la que se mide la potencia de la señal radioeléctrica Wi-Fi. La potencia normalmente se mide en vatios (W), aunque en escenarios inalámbricos se suele trabajar con valores de milivatios (mW). En este tipo de entornos, existen importantes variaciones del nivel de potencia en transmisión y recepción, por tanto, y por comodidad, se suele trabajar con valores de potencia logarítmicos.

El decibelio-milivatio (dBm) es una medida de potencia expresada en decibelios (dB) relativa a 1 milivatio (mW) [16]. La fórmula por la que se puede obtener un valor de potencia en dBm ($P(dBm)$) es la siguiente:

$$P(dBm) = 10 \log \left(\frac{P(mW)}{1 mW} \right) \quad (1)$$

Donde $P(mW)$ hace referencia al valor inicial de potencia en milivatios (mW).

El Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF) es el encargado de la gestión del espectro radioeléctrico en España, y entre otras atribuciones, se encarga de legislar sobre los niveles de potencia que un dispositivo Wi-Fi puede radiar. Las dos normas de utilización (UN) que regulan las limitaciones de radiación las podemos ver en la Tabla 7.

Norma de utilización	Banda de frecuencia	Límite de potencia
UN-85	2400 a 2483,5 MHz	$PIRE_{m\acute{a}x} = 100 \text{ mW}$
UN-128	5150 a 5350 MHz	$PIRE_{m\acute{a}x} = 200 \text{ mW}$ (con TPC ¹) $PIRE_{m\acute{a}x} = 100 \text{ mW}$ (sin TPC)
	5470 a 5725 MHz	$PIRE_{m\acute{a}x} = 1 \text{ W}$ (con TPC) $PIRE_{m\acute{a}x} = 500 \text{ mW}$ (sin TPC)

Tabla 7. Límites de potencia radiada para las bandas Wi-Fi. [17]

En los entornos inalámbricos Wi-Fi, la intensidad de potencia recibida se conoce como *Received Signal Strength Indicator* (RSSI). Los valores de RSSI conforman una escala entre 0 y -95 dBm, siendo 0 dBm el valor más alto de dicha escala. Dependiendo del nivel de potencia recibido tendremos un valor de RSSI distinto en el dispositivo receptor, y podremos calificarlo dependiendo de su calidad, como se puede comprobar en la Tabla 8.

RSSI (dBm)	Observaciones
-40 a -60	Recepción ideal con tasas de transferencia estables
hasta -67	Mínima intensidad de señal para aplicaciones en tiempo real (<i>Streaming</i>) o que requieran alta fiabilidad
-70	Mínima intensidad de señal para aplicaciones que requieran fiabilidad en la entrega de paquetes (Email o web)
-80	Mínima señal aceptable para llevar a cabo la conexión.
-90	Funcionalidad altamente improbable

Tabla 8. Posibles valores de RSSI en recepción. [18]

3.3.9 Balance de potencias

Es básico en la planificación de cualquier radioenlace realizar el cálculo de su balance de potencia. Para llevar a cabo esta tarea, es fundamental conocer la banda de frecuencia a la que estamos trabajando, las propiedades del entorno de transmisión y obviamente las características técnicas de los dispositivos empleados.

En la Figura 9 se ha representado el esquema básico de un radioenlace de comunicación, en el que también se pueden apreciar parámetros clave para el cálculo del balance de potencia, los cuales se definen de forma individualizada posteriormente.

¹ TPC: Técnicas de control de potencia

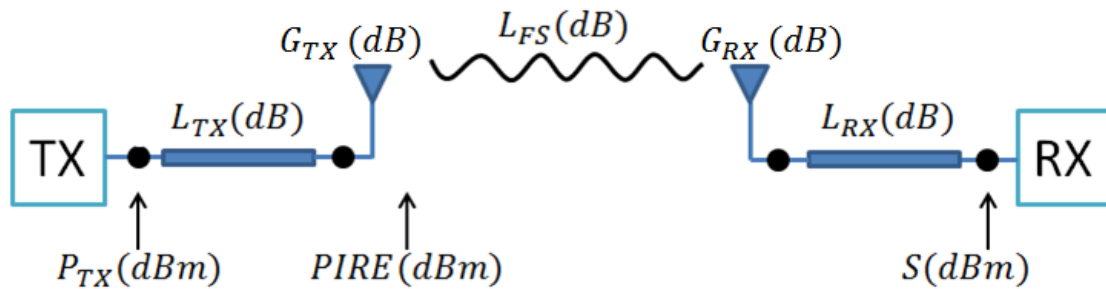


Figura 9. Estructura básica de un enlace de comunicación. *Elaboración propia.*

- P_{TX} (dBm): potencia de transmisión. Nivel de potencia de la señal radiada por el dispositivo transmisor.
- L_{TX} (dB): pérdidas de cables y conectores del transmisor.
- G_{TX} (dBi): ganancia de la antena transmisora.
- G_{RX} (dBi): ganancia de la antena en recepción.
- L_{RX} (dB): pérdidas de cables y conectores del receptor.
- S (dBm): sensibilidad del receptor. Valor mínimo de potencia que el dispositivo receptor puede detectar.
- L_{FS} (dB): pérdidas básicas de propagación en el espacio libre. Dependen de la frecuencia y la distancia entre los dispositivos involucrados en la comunicación. En lo sucesivo, entenderemos las pérdidas de propagación en espacio libre como aquellas que modela la ecuación (2).

$$L_{FS} (dB) = 20 \log(d) + 20 \log(f) + 32,45 \quad (2)$$

Donde:

- f_c : frecuencia en GHz.
- d : distancia en metros entre dispositivos transmisor y receptor.

A partir de estos datos podemos calcular el margen frente a desvanecimientos ($F(dB)$) del enlace, y con ello conocer la idoneidad del mismo. Se entiende éste margen como aquellos decibelios de atenuación que podemos añadir al enlace sin que la relación señal a ruido del canal no disminuya hasta valores inferiores a un mínimo especificado.

$$F(dB) = P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - L_{TX} - L_{RX} - L_{FS} - S \quad (3)$$

Para realizar un ejemplo del balance de potencia en un enlace Wi-Fi genérico necesitamos conocer los valores típicos de cada uno de estos parámetros. Dichos valores han quedado recogidos en la Tabla 9.

Parámetro	Valor típico
P_{TX} (dBm)	15 dBm
L_{TX} (dB)	Entre 1 y 3 dB
G_{TX} (dBi)	Entre 0 y 3 dBi
G_{RX} (dBi)	Entre 0 y 3 dBi
L_{TX} (dB)	Entre 1 y 3 dB
S (dBm)	-80 dBm

Tabla 9. Parámetros típicos de transmisión y recepción en un enlace Wi-Fi.

Capítulo 4. Caracterización del canal en banda estrecha para entornos indoor

4.1 Canal radio

Es de vital importancia para el desarrollo de nuestro trabajo el conocer las características del canal de propagación por el que se transmitirán las señales, y es que desde el primer momento en el que una antena radia una señal al espacio, ésta comienza a sufrir diferentes efectos que degradan su calidad.

La señal, al propagarse por el espacio libre entre el transmisor y el receptor, puede topar con obstáculos de diferente naturaleza, provocando que parte de ésta señal se refleje y otra parte siga su camino. A estos elementos se les llama difusores o *scatterers* y generan efectos de reflexión, dispersión (*Scattering*) y difracción. [19] Estas primeras señales reflejadas pueden volver a reflejarse de nuevo en los mismos o en otros obstáculos, de forma que la señal recibida al final del proceso es la suma de la señal principal y una serie de reflexiones provocadas por los obstáculos. Dicho fenómeno es conocido como propagación multicamino (*multipath*).

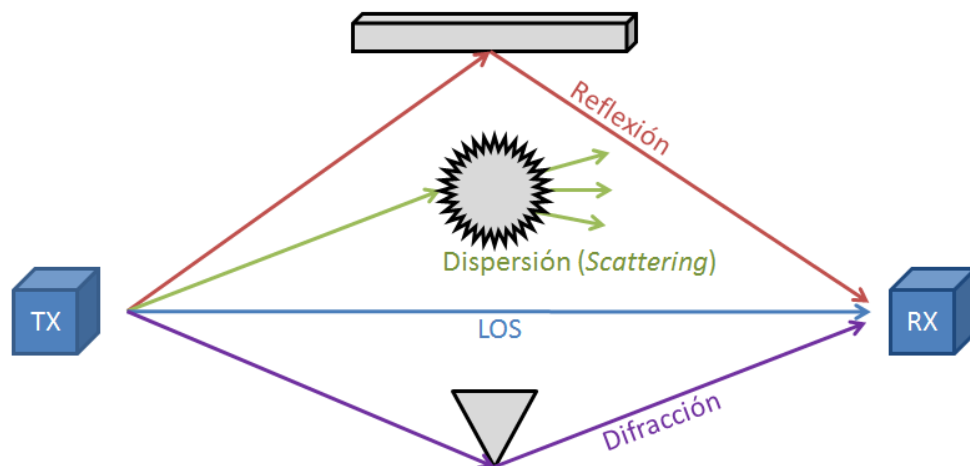


Figura 10. Visión directa (LOS) y efectos de reflexión, dispersión y difracción en la señal. *Elaboración propia*

Los efectos principales de la propagación multicamino son la atenuación y el ensanchamiento del retardo de canal (*delay spread*), lo que ocasiona el problema de la interferencia entre símbolos (ISI).

Supóngase un mismo símbolo que fruto de los efectos del multicamino, llega al receptor por diferentes vías e instantes de tiempo (distinto retardo). Si en el receptor se suman dichas réplicas, lo que se tendrá finalmente es una superposición de pulsos conocida como interferencia

entre símbolos (ISI). El punto crítico de la interferencia entre símbolos se produce cuando el receptor no puede distinguir los cambios de estado en el símbolo.

Es fácil intuir que un factor importante para el ISI es el tiempo de duración del símbolo. Si la duración del símbolo es muy pequeña con respecto al retardo de propagación (*delay spread*), el impacto de la interferencia entre símbolos es muy relevante, y viceversa.

Una forma de minimizar el efecto es extender el periodo de los símbolos hasta el punto de ser mayor al *delay*, y aunque una porción del símbolo seguirá afectada por el retardo, la mayor parte no quedará perjudicada por el efecto de ISI. También con tasas de símbolo menores y tecnologías como la modulación OFDM, de la que ya se habló en su momento, se puede reducir este efecto.

4.2 Caracterización del canal en banda estrecha y banda ancha

Los sistemas de comunicación pueden dividirse en sistemas de banda estrecha y sistemas de banda ancha, siendo el ancho de banda de coherencia el que determina ésta clasificación. Entendemos el ancho de banda de coherencia (B_c) como el ancho de banda en el que la respuesta en frecuencia se considera plana. [20]

Por tanto, en el caso de que el ancho de banda de la señal sea menor que el ancho de banda de coherencia ($B_s < B_c$), estaremos ante un canal de banda estrecha, en caso contrario sería un sistema de banda ancha. [21]

El movimiento de los terminales de la comunicación y de los elementos difusores genera una variación de las características temporales del canal, derivando en ondas constructivas o destructivas en el receptor, en función de sus características. Por esta razón, el nivel de potencia de la señal en el receptor varía, conociéndose este efecto como desvanecimiento o *fading*. Se contemplan varios tipos de *fading* dependiendo de la duración del mismo:

- *Pathloss*: desvanecimiento a largo plazo (*long-term fading*). Pérdidas básicas de radiación debidas a enlaces de larga distancia. Este tipo de desvanecimiento se caracteriza por ser lento y de poca intensidad.
- *Shadowing*: desvanecimiento a medio plazo (*mid-term fading*). Fenómeno para trayectos de varios centenares de λ . Es un desvanecimiento lento y de poca intensidad, como sucedía con el desvanecimiento a largo plazo, y es debido a los elementos fijos del entorno como podrían ser la orografía del terreno o los diferentes tipos de edificaciones.
- *Multipath fading*: desvanecimientos a corto plazo (*short-term fading*). Fruto del efecto multicamino provocado por obstáculos variables del entorno como personas, edificaciones y objetos a unas distancias de decenas de λ . Genera desvanecimientos rápidos y profundos.

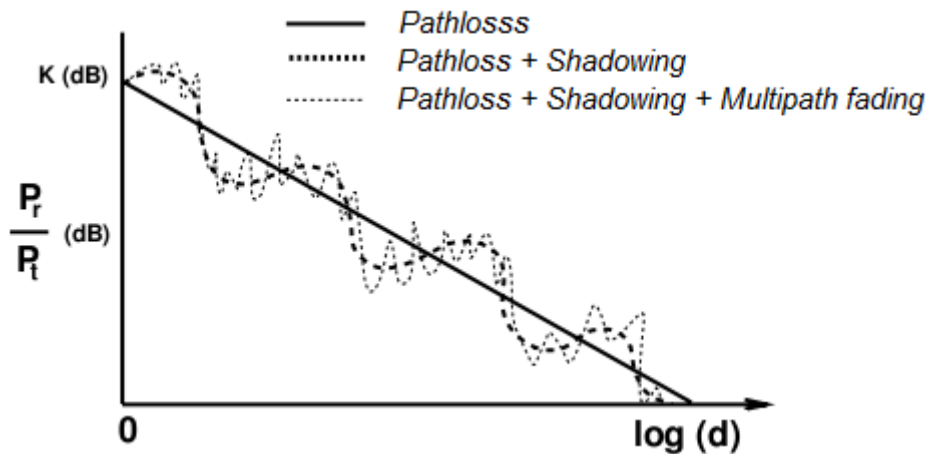


Figura 11. Efectos del desvanecimiento o *fading* con la distancia. [1]

Para solucionar los problemas ocasionados por la propagación multicamino o la interferencia entre símbolos (ISI), existen novedosas tecnologías como la modulación OFDM o los sistemas MIMO de múltiples antenas en transmisión y recepción, de los que se habló en el capítulo anterior.

4.3 Modelos de propagación *indoor*.

Se entiende por modelo de propagación al conjunto de fórmulas matemáticas, representaciones gráficas y/o algoritmos de los que se hace uso para normalizar el comportamiento de la radiopropagación en diferentes escenarios. Existen modelos experimentales, también conocidos como empíricos o estadísticos, y modelos teóricos. [22]

Es básico para el desarrollo de nuestro trabajo conocer detalladamente qué tipos de modelos de propagación en interiores existen y la forma en la que funcionan, pues una de las tareas más importantes que se presenta en el proyecto es la de ajustar las medidas que se tomen en diferentes entornos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación por los diferentes modelos estudiados.

A continuación se analizarán los modelos de propagación en interiores más destacados, haciendo hincapié en su definición y en las fórmulas matemáticas de las que hace uso. [23]

4.3.1 WINNER II D112 V1.2 Model

El modelo de propagación *WINNER II* fue diseñado para escenarios de interior, exterior e interior-exterior en el rango de frecuencias desde 2-6 GHz. Presenta expresiones para las pérdidas de propagación *Path loss (PL)* en situaciones con visión directa (LOS) y sin visión directa (NLOS) entre diferentes estancias. Las expresiones matemáticas de ambos modelos quedan plasmadas en las ecuaciones (4) y (5), respectivamente.

$$PL_{LOS} (dB) = 18,7 \log(d) + 46,8 + 20 \log\left(\frac{f_c}{5}\right) \quad (4)$$

$$PL_{NLOS}(dB) = 20 \log(d) + 46,4 + 20 \log\left(\frac{f_c}{5}\right) + 12n_W + L_f(n_f) \quad (5)$$

$$L_f(dB) = 17 + 4(n_f - 1) \quad (6)$$

Donde:

- f_c : frecuencia en GHz.
- d : distancia en metros entre dispositivos transmisor y receptor.
- n_w : número de muros entre transmisor y receptor.
- L_f (dB): factor de pérdidas por penetración en el suelo (si y solo si ambos dispositivos están en diferente piso).
- n_f : número de suelos entre transmisor y receptor.

4.3.2 ITU-R M.2135-1 Model

Las recomendaciones ITU-R constituyen una serie de normas técnicas internacionales desarrolladas por el sector de las radiocomunicaciones de la ITU (*International Telecommunication Union*). Se van a analizar dos modelos ITU-R para el modelado de la propagación en interiores.

El primer modelo del que vamos a hablar será el *ITU-R M.2135-1 Model*. Este modelo, al igual que sucediera con *WINNER II*, caracteriza las pérdidas de propagación en interiores tanto para situaciones de LOS con la ecuación (7), como para NLOS con la ecuación (8). [24]

$$PL_{LOS} (dB) = 16,9 \log(d) + 32,8 + 20 \log(f_c) \quad (7)$$

$$PL_{NLOS} (dB) = 43,3 \log(d) + 11,5 + 20 \log(f_c) \quad (8)$$

Donde:

- f_c : frecuencia en GHz.
- d : distancia en metros entre dispositivos transmisor y receptor.

4.3.3 ITU-R P.1238-8 Model

Este otro modelo ITU-R, a diferencia de los anteriores, no distingue las situaciones de LOS y NLOS. Presenta las pérdidas de propagación para un escenario general de la forma que podemos ver en la ecuación (9):

$$PL (dB) = 20 \log(f) + N \log(d) + L_f(n_f) - 28 \quad (9)$$

Donde:

- f : frecuencia en MHz.
- N : coeficiente de pérdida de potencia debida a la distancia.
- d : distancia en metros entre dispositivos transmisor y receptor.
- L_f (dB): factor de pérdidas por penetración en el suelo. $L_f=0$ para $n_f=0$.
- n_f : número de suelos entre transmisor y receptor. $n_f \geq 0$.

En las Tablas 10 y 11 se indican los valores típicos del coeficiente de pérdida de potencia (N) y del factor de pérdidas de penetración en el suelo (L_f) en función de la frecuencia.

Frecuencia	Edificio residencial	Edificio de oficinas	Edificio comercial	Fábrica	Pasillo
900 MHz	–	33	20	–	–
1,25 GHz	–	32	22	–	–
1,9 GHz	28	30	22	–	–
2,1GHz	–	25,5	20	21,1	17
2,4 GHz	28	30	–	–	–
3,5 GHz	–	27	–	–	–
2,625 GHz	–	44	–	33	–
4 GHz	–	28	22	–	–
5,2 GHz	30	31	–	–	–
5,8 GHz	–	24	–	–	–
28 GHz	–	–	27,6	–	–
60 GHz	–	22	17	–	16
70 GHz	–	22	–	–	–

Tabla 10. Valores del coeficiente de pérdida de potencia (N). [25]

Frecuencia	Edificio residencial	Edificio de oficinas	Edificio comercial
900 MHz	–	9 (1 piso) 19 (2 pisos) 24 (3 pisos)	–
1,8-2 GHz	$4 n_f$	$15 + 4 (n_f - 1)$	$6 + 3 (n_f - 1)$
2,4 GHz	10 (apartamento) 5 (casa)	14	–
3,5 GHz	–	18 (1 piso) 26 (2 pisos)	–
5,2 GHz	13 (apartamento) 7 (casa)	16 (1 piso)	–
5,8 GHz	–	22 (1 piso) 28 (2 pisos)	–

Tabla 11. Valores del factor de pérdidas de penetración en el suelo (L_f), siendo n_f el número de pisos penetrados. [25]

4.3.4 Cost 231 Models

Cost 231 propone tres modelos de propagación en interiores: *One-slope model (OSM)*, *Linear-slope model (LSM)* y *Multi walls multi floors model (MWM)*. Dichos modelos están basados en mediciones reales en distintas ciudades europeas inicialmente a 900 y 1800 MHz y posteriormente escalado a otras frecuencias. [26] [27]

A. *One-slope model (OSM)*.

Establece una dependencia lineal entre las pérdidas básicas de propagación (a un metro de distancia, L_0) y el logaritmo de la distancia, sin tener en cuenta otros elementos del entorno como las paredes.

$$PL (dB) = L_0 + 10N \log(d) \quad (10)$$

$$L_0 (dB) = 20 \log\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) \quad (11)$$

Donde:

- $L_0 (dB)$: pérdidas básicas de propagación a un metro de distancia.
- N : índice de disminución de potencia. (Tabla 12).
- d : distancia en metros entre dispositivos transmisor y receptor.

Entorno	Mismo piso	Dos pisos	Más pisos	Abierto	Pasillo
N	4,0	5,2	5,4	1,9	1,4

Tabla 12. Valores del índice de disminución de potencia N .

B. *Linear-slope model (LSM)*.

Modela las pérdidas como función lineal de la distancia, como se aprecia en la ecuación (12). Es el modelo más simple ya que solo presenta un parámetro a ajustar (α), y al igual que *One-slope model*, no contempla la influencia de la penetración en muros o suelos. Las pérdidas en espacio libre (L_{FS}) fueron expuestas en el apartado 3.3.9 *Balance de potencia*.

$$PL (dB) = L_{FS} + \alpha d \quad (12)$$

Donde:

- $L_{FS} (dB)$: pérdidas en el espacio libre definidas en la ecuación (2).
- d : distancia en metros entre dispositivos transmisor y receptor.
- α : coeficiente de atenuación (dB/m). (Tabla 13).

Entorno	Mismo piso	Dos pisos	Más pisos	Abierto
α (dB/m)	0,62	2,8	0,22	

Tabla 13. Valores del coeficiente de atenuación α .

C. *Multi walls multi floors model (MWM)*.

A diferencia de los dos modelos Cost 231 analizados anteriormente, *Multi walls multi floors model (MWM)* sí tiene en cuenta la atenuación de los muros y suelos. Las pérdidas de propagación en este caso se modelan según la ecuación (13):

$$PL (dB) = L_{FS} + L_C + \sum_{i=1}^N K_{wi} L_{wi} + K_f \left[\frac{K_f + 2}{K_f + 1} b \right] L_f \quad (13)$$

Donde:

- $L_{FS} (dB)$: pérdidas en el espacio libre.
- L_C : coeficiente de ajuste optativo que suele tomar valores cercanos a cero.
- K_{wi} : número de muros de tipo i entre transmisor y receptor.
- L_{wi} : coeficiente de pérdidas debido a muro de tipo i .
- K_f : número de suelos entre transmisor y receptor.
- L_f : coeficiente de pérdidas debido a suelo.
- b : parámetro empírico.

En la Tabla 14 se resumen los distintos coeficientes optimizados para el modelo *Multi walls multi floors model (MWM)* de Cost 231.

	L_{w1}	L_{w2}	L_f	b
Factor (dB)	3,4	6,9	18,3	0,46
Entorno	Muros internos finos	Muros internos	Suelos	
Descripción	-Yeso -Muro con muchos huecos (ventanas)	-Hormigón/ladrillo -Mínimo número de huecos	-Baldosas/hormigón -Espesor < 30 cm	

Tabla 14. Valores del coeficiente de atenuación α . [22]

Capítulo 5. Configuración de la campaña de medidas

5.1 Equipos empleados

En el presente trabajo se ha analizado el canal radio conectando dispositivos mediante Wi-Fi. Las conexiones realizadas tienen en común que el dispositivo transmisor es el mismo. Éste dispositivo transmisor es un *Smartphone* modelo *iPhone 6*. Como dispositivos receptores se dispone de un ordenador portátil *Acer Aspire 5575G* y un segundo *Smartphone* modelo *bq Aquaris M5*.

En la Tabla 15 podemos observar detalladamente las características de conectividad de los *Smartphone* empleados en el proyecto.

Conectividad	<i>bq Aquaris M5</i>	<i>iPhone 6</i>
Wi-Fi	802.11 b/g/n	802.11a/b/g/n/ac
Localización	GPS y GLONASS	
NFC	NFC (HCE)	
Bluetooth	Bluetooth 4.1	Bluetooth 4.2
2G	GSM/EDGE (850,900,1800,1900 MHz)	
3G	HSPA+ (900,2100 MHz)	CDMA EV-DO Rev. A y Rev. B (800,1700/2100,1900,2100 MHz).
		TD-SCDMA (1900, 2000 MHz)
		UMTS/HSPA+/DC-HSDPA (850,900,1700/2100,1900,2100 MHz)
4G (LTE)	FDD (800,1800,2100,2600 MHz)	FFD (700,800,850,900,1800,1900,2100,2600 MHz)
		TDD (1900,2300,2500,2600 MHz)

Tabla 15. Conectividad de los *smartphones* empleados.

Con respecto a la conectividad del ordenador portátil cabe destacar que soporta los protocolos Wi-Fi 802.11b/g/n pero no dispone de conexión inalámbrica Bluetooth.

Se plantean dos enlaces de medida, donde como ya se ha dicho antes, el dispositivo transmisor es común. Se pueden apreciar estos dos enlaces de comunicación en la Figura 12: TX-RX1 (*iPhone 6* – *bq Aquaris M5*) y TX-RX2 (*iPhone 6* – *Acer 5575G*).



Figura 12. Dispositivos de comunicación empleados en el proyecto.

No ha sido necesario adquirir ningún otro dispositivo para la realización de las medidas, pues los requerimientos técnicos de las aplicaciones empleadas son mínimos y los dispositivos previamente expuestos pueden ejecutar perfectamente su funcionamiento.

5.2 Software para Android y Windows

En referencia al software empleado, únicamente el receptor *bq Aquaris M5* y el ordenador portátil precisaban de programas adicionales. En el caso del dispositivo transmisor *iPhone 6*, no ha sido necesario, pues su única función era la de proporcionar la señal Wi-Fi que los receptores posteriormente captarían y analizarían.

Para los dispositivos receptores, se buscaban aplicaciones que pudieran obtener y procesar datos de las redes Wi-Fi cercanas a ellos. A continuación se analizará el software empleado finalmente en los dispositivos receptores, así como las alternativas que se desestimaron por no cumplir con los requisitos propuestos o por cualquier otro motivo. En primer lugar, para el caso del ordenador portátil *Acer 5575G* se tantearon dos posibles alternativas:

- A. *Homedale*: herramienta que nos permite conocer rápidamente información sobre las redes WLAN más cercanas (intensidad de señal, canal, frecuencia, etc.). Permite exportar datos de tráfico en formato .txt o en tablas Excel, aunque su exportación es algo basta, lo que dificulta el análisis de los datos. Se pueden realizar barridos de datos como mínimo cada segundo.
- B. *Acrylic Wi-Fi Professional*: escáner Wi-Fi profesional con el que podremos detectar y analizar los puntos de acceso Wi-Fi más cercanos a nuestro ordenador. Para hacer uso de este *software* fue necesaria una licencia de uso en el ámbito académico, pues es una herramienta de pago. Proporciona datos similares a *Homedale*, como puede ser el nivel de señal, canales, seguridad, etc. Una de las grandes ventajas que presenta *Acrylic Wi-Fi Professional* es que permite exportar los datos en tablas de Excel de forma mucho más accesible y manejable que el caso de *Homedale*, además, permite el filtrado de resultados agilizando dicha exportación. Es por esta razón por la que se ha escogido como el software a emplear en el ordenador portátil.

El análisis de los parámetros de las redes, al igual que pasaba en *Homedale*, se realiza cada segundo.

En las Figuras 13 y 14 se pueden apreciar sendas capturas de los *softwares* recién analizados en las que se puede apreciar algunos de los parámetros proporcionados. Entre éstos parámetros podemos encontrar por ejemplo el identificador de punto de acceso (SSID) o la potencia recibida en dBm (RSSI, *Received Signal Strength Indicator*).

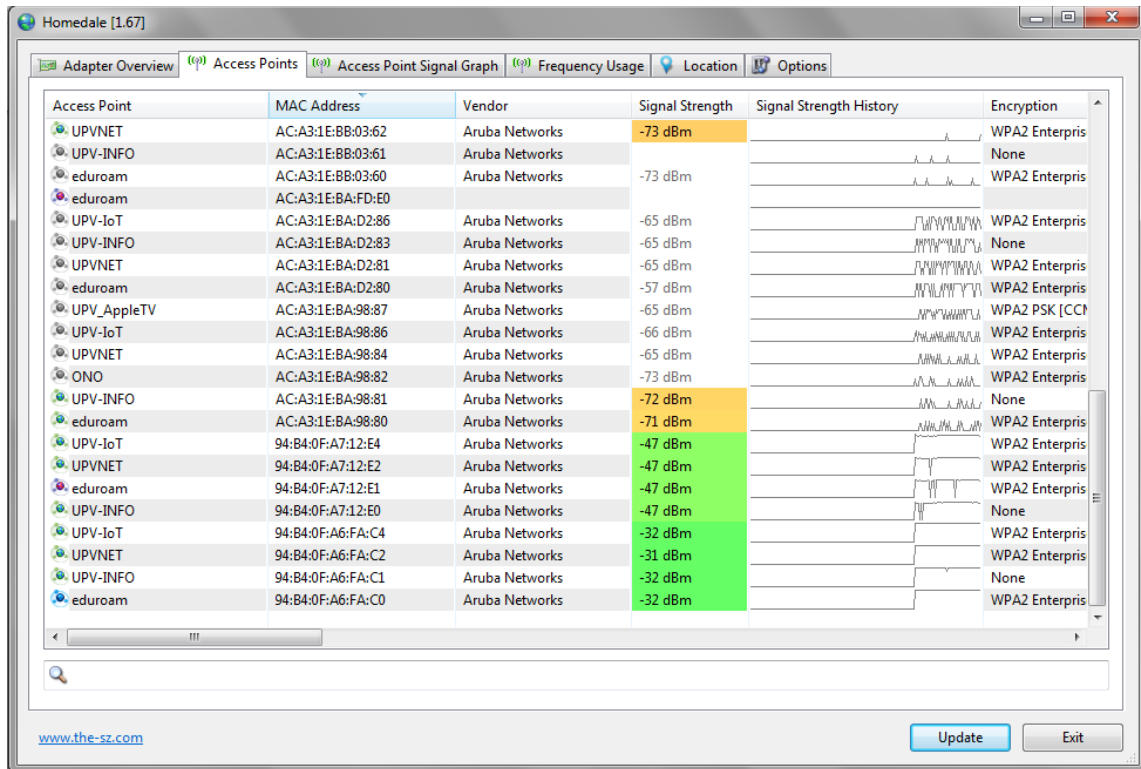


Figura 13. Captura de pantalla del software *Homedale*.

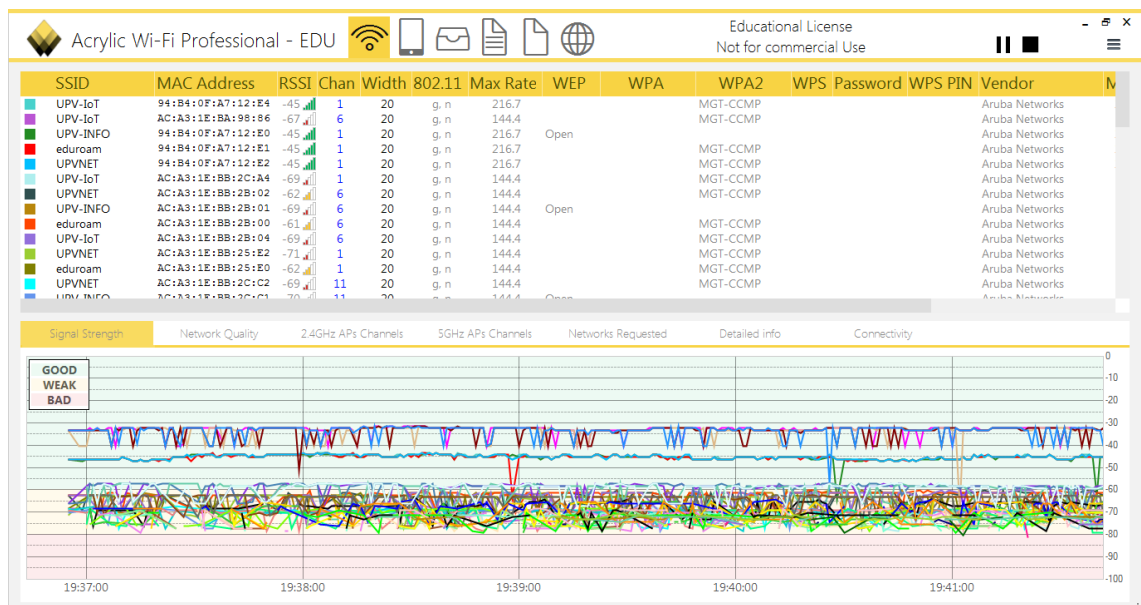


Figura 14. Captura de pantalla del software *Acrylic Wi-Fi Professional*.

Con respecto al otro receptor, el *smartphone bq Aquaris M5*, se comprobó el funcionamiento de una serie de aplicaciones móviles disponibles en la librería de aplicaciones *Play Store* del sistema operativo *Android*. Igual que pasaba con el software del ordenador portátil, algunas de ellas fueron descartadas por carencias técnicas o por mal funcionamiento.

Al tratar con un dispositivo móvil con menor capacidad de procesamiento de datos que la que pudiera tener por ejemplo un ordenador, interesa que la forma en la que se captan y exportan estos datos por parte de la aplicación sea lo más cómodo posible para el usuario, siempre que cumpla con los requerimientos técnicos necesarios. A continuación veremos tres posibles alternativas, y cuál de ellas fue la escogida finalmente:

- A. *RF Signal Tracker*: software capaz de captar datos de las redes Wi-Fi que rodean al dispositivo, como puede ser su SSID, intensidad, etc. Permite la exportación de datos en formato XML, CSV y KML. Presenta una interfaz sencilla de cara al usuario, pero se producen fallos a la hora de guardar los datos, por lo que se desestimó su uso para nuestro proyecto.

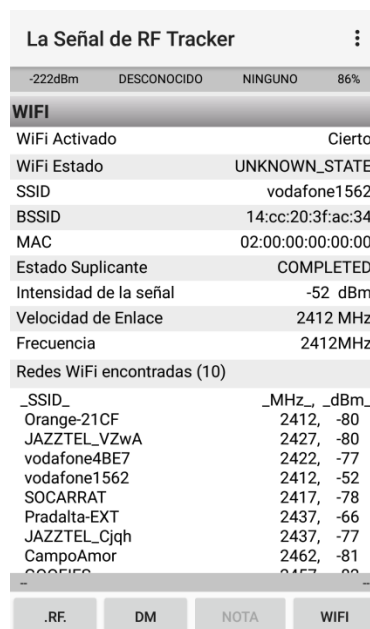


Figura 15. Captura de pantalla del software *RF Signal Tracker*.

- B. *WiFi Indoor Localization*: aplicación capaz de medir los parámetros básicos de las redes Wi-Fi cercanas. No era posible realizar un filtrado previo, por lo que se recolectaban datos de todas las redes, generando un archivo CSV muy complejo para su estudio. La intención, como se ha comentado anteriormente, es disponer de una aplicación que proporcione facilidades con el tratamiento de datos, por lo que se continuó buscando un software más accesible en ese sentido.

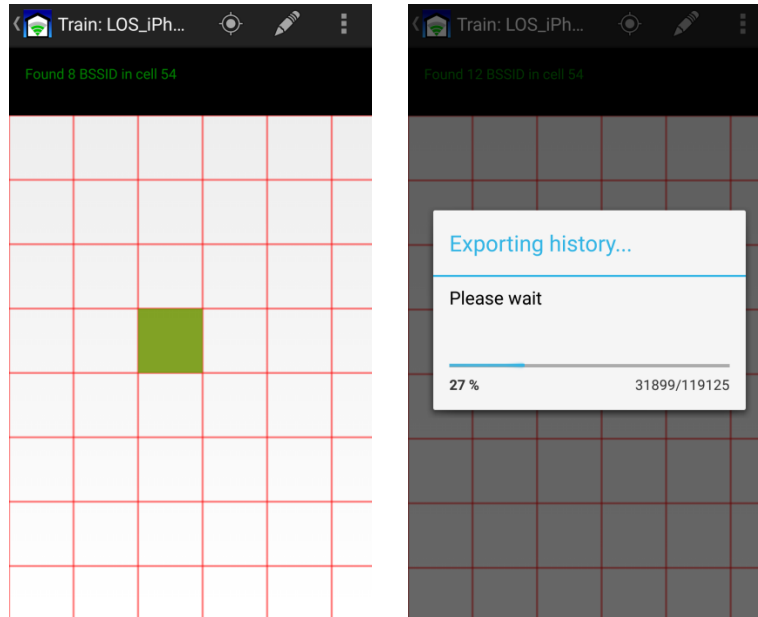


Figura 16. Captura de pantalla del software RF WiFi Indoor Localization.

- C. *Network Monitor*: herramienta de diagnóstico que analiza periódicamente las redes Wi-Fi próximas y guarda los resultados en una base de datos propia sobre el dispositivo. Una de sus mayores ventajas es que analiza únicamente la red deseada, simplificando de manera muy significativa el montante de datos a procesar posteriormente. Además de lo anterior, ésta aplicación permite exportar la información de la base de datos creada en diferentes formatos (.txt, Excel, etc.), lo cual facilita inmensamente la tarea del análisis de los mismos. Por si no fuera suficiente, *Network Monitor* permite una frecuencia de recogida de datos de $\frac{1}{2}$ segundo. Por estos aspectos se decidió hacer uso de dicha aplicación en el receptor *bq Aquaris M5*.

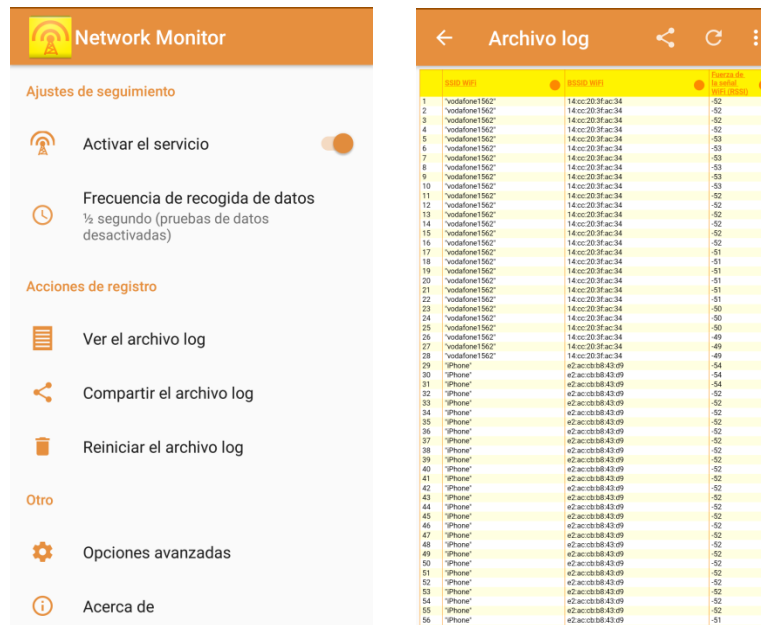


Figura 17. Captura de pantalla del software Network Monitor.

5.3 Proceso de medida

Como se adelantó en los apartados anteriores de este punto de la memoria, para la ejecución de las medidas se hizo uso de tres dispositivos, uno de ellos transmisor y los dos restantes receptores. La tarea del equipo transmisor *iPhone 6* era la de funcionar como punto de acceso (AP) detectable vía Wi-Fi por los receptores mediante la opción *Compartir internet* del sistema operativo *iOS* de *Apple*. Por su parte, el *software* instalado en los receptores *bq Aquaris M5* y *Acer 5575G*, con sistemas operativos *Android* y *Windows* respectivamente, llevaría a cabo la tarea de captar y analizar las tramas proporcionadas por nuestro transmisor.

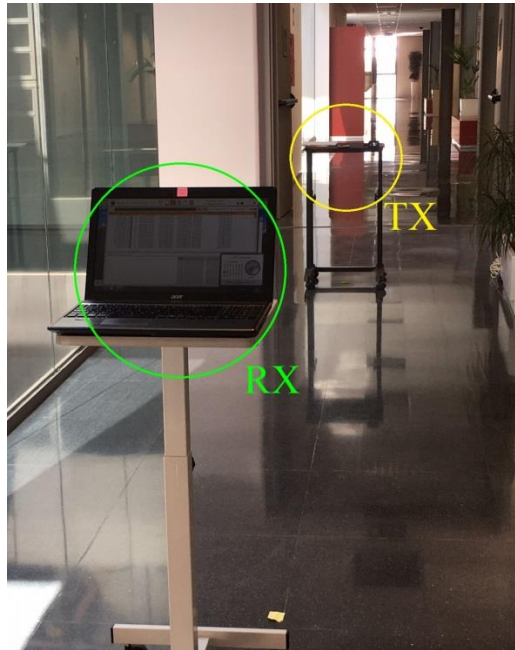


Figura 18. Fotografía del escenario de medidas en visión directa (LOS).

Para llevar a cabo las medidas en cada uno de los escenarios se situó el dispositivo transmisor en una mesa y los dos dispositivos receptores en otra, de la forma que se ve en la Figura 18. Ambas mesas eran independientes, móviles y mantenían a los dispositivos a un metro de altura con respecto al suelo.

El proceso de medida comienza con la tarea de fijar el dispositivo transmisor como punto de acceso, para ello se hace uso de la función *Compartir internet*. Desde el momento en el que se activa esta herramienta cualquier dispositivo Wi-Fi puede conectarse a la red del terminal transmisor, siendo necesaria para ello una contraseña de acceso. Esto significa que una vez esté funcionando nuestro transmisor como punto de acceso, los dispositivos receptores pueden captar tramas *beacon* emitidas por el mismo mediante el *software* escogido.



Figura 19. Captura de pantalla de la herramienta *Compartir internet*.

Como ya se introdujo en el apartado 5.2 de este trabajo, el *software* escogido para el receptor *bq Aquaris M5* fue *Network Monitor*. Dicha aplicación tenía la capacidad de analizar determinadas características de la red Wi-Fi a la que se conectaba el dispositivo, por lo que establecer la conexión entre transmisor y receptor es el primer paso. La toma de datos periódica en *Network Monitor* cada $\frac{1}{2}$ segundos da comienzo al pulsar en “Activar el servicio”, creando un archivo en forma de base de datos, el cual se puede exportar en múltiples formatos para su posterior análisis mediante *Matlab*. En la Figura 20 se pueden apreciar, de izquierda a derecha, capturas de pantalla cronológicas de cada uno de los procesos recién explicados. El parámetro más importante de todo el conjunto de datos recopilados será el valor de RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) en dBm, aunque también nos proporciona valores de instantes de tiempo, identificador SSID o la dirección física del punto de acceso.

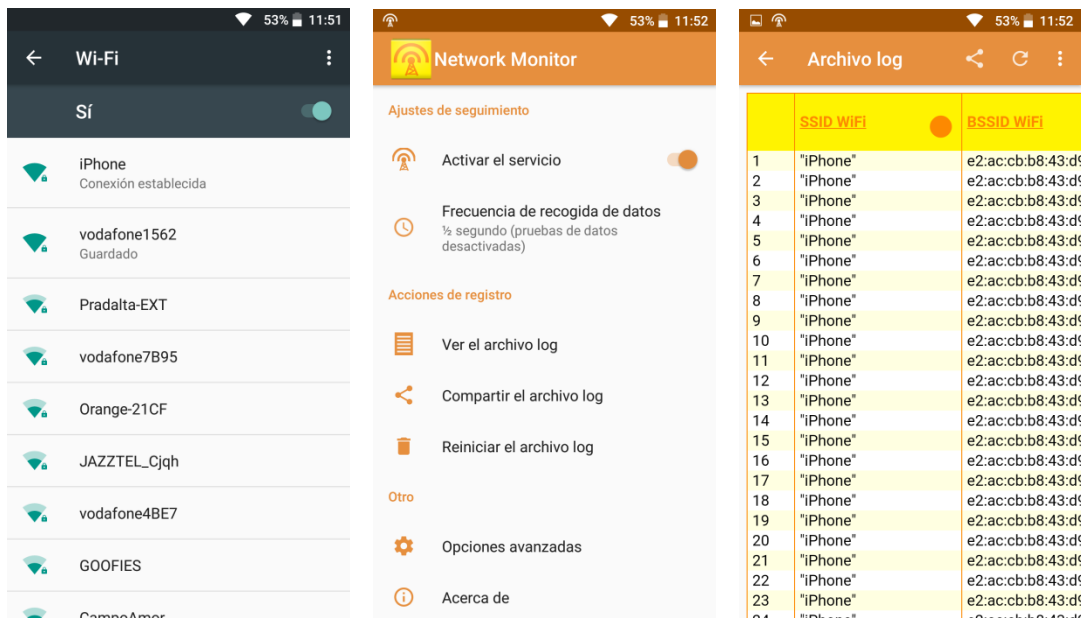


Figura 20. Capturas de pantallas de la toma de datos por el software *Network Monitor*.

Con respecto al otro receptor, el ordenador portátil *Acer 5575G*, la herramienta elegida fue *Acrylic Wi-Fi Professional*. La diferencia principal entre *Acrylic Wi-Fi Professional* y *Network Monitor* es que la primera analiza las características de todas las redes Wi-Fi que tiene a su alrededor, al contrario que la segunda, la cual sólo analiza aquella a la que está conectada. Dicha situación sería problemática si *Acrylic Wi-Fi Professional* no dispusiera de una

herramienta de filtrado de redes, y es que este *software* puede filtrar redes por distintos parámetros como la dirección física (MAC), el identificador SSID o el nivel de potencia recibido del punto de acceso deseado. En este trabajo se ha optado por la opción de filtrado mediante la dirección MAC, y tiene una sintaxis tal como la que se ve a continuación:

ieee80211.management.sa == (dirección física en formato hexadecimal del punto de acceso deseado)

La Figura 21 muestra la interfaz principal de *Acrylic Wi-Fi Professional*, en ella podemos ver todas las redes a las que tiene alcance nuestro receptor y algunos de sus parámetros más destacados, como su dirección MAC, el valor de RSSI (dBm), canal, BW, etc. Todos estos parámetros se actualizan con un periodo de 1 segundo.

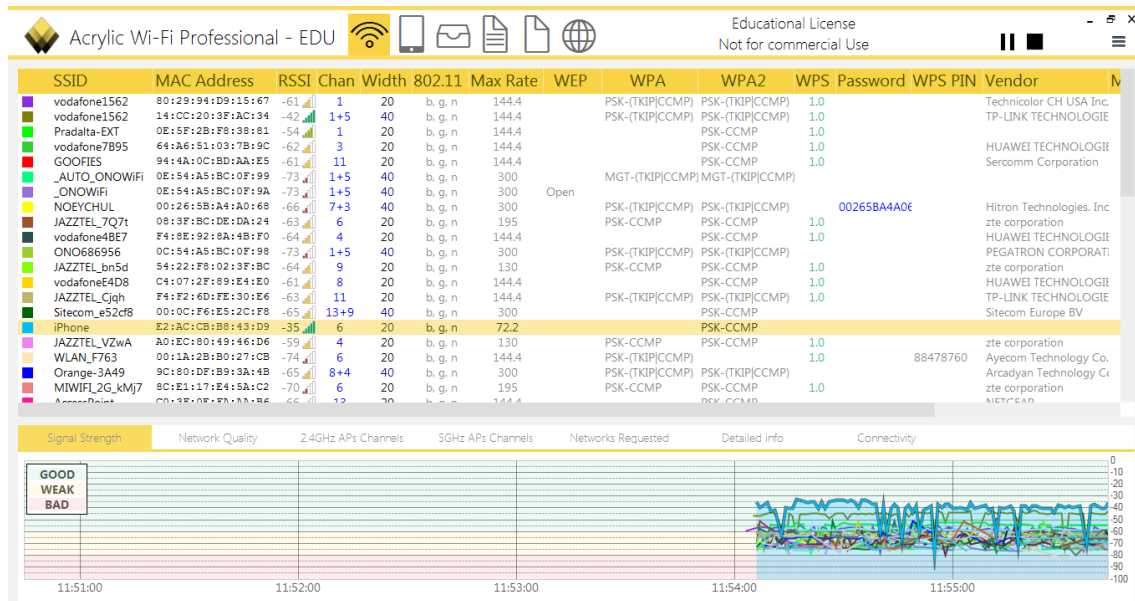


Figura 21. Captura de pantalla de la interfaz principal de *Acrylic Wi-Fi Professional*.

De la Figura anterior se extrae que nuestro dispositivo transmisor con SSID “iPhone” presenta la siguiente dirección física (MAC): E2:AC:CB:B8:43:D9, por lo tanto, la sintaxis del filtrado que llevamos a cabo tendrá el siguiente aspecto:

ieee80211.management.sa == E2:AC:CB:B8:43:D9

El resultado del filtrado se puede ver en la Figura 22, donde aparecen datos únicamente del punto de acceso deseado. En el momento que se quieran exportar los datos recopilados será suficiente con hacer clic derecho en la interfaz y seleccionar la opción “Copy All”, para de esta forma poder llevar toda la información captada a una hoja de Excel y poderla analizar de una forma más eficiente con otras herramientas como *Matlab*.

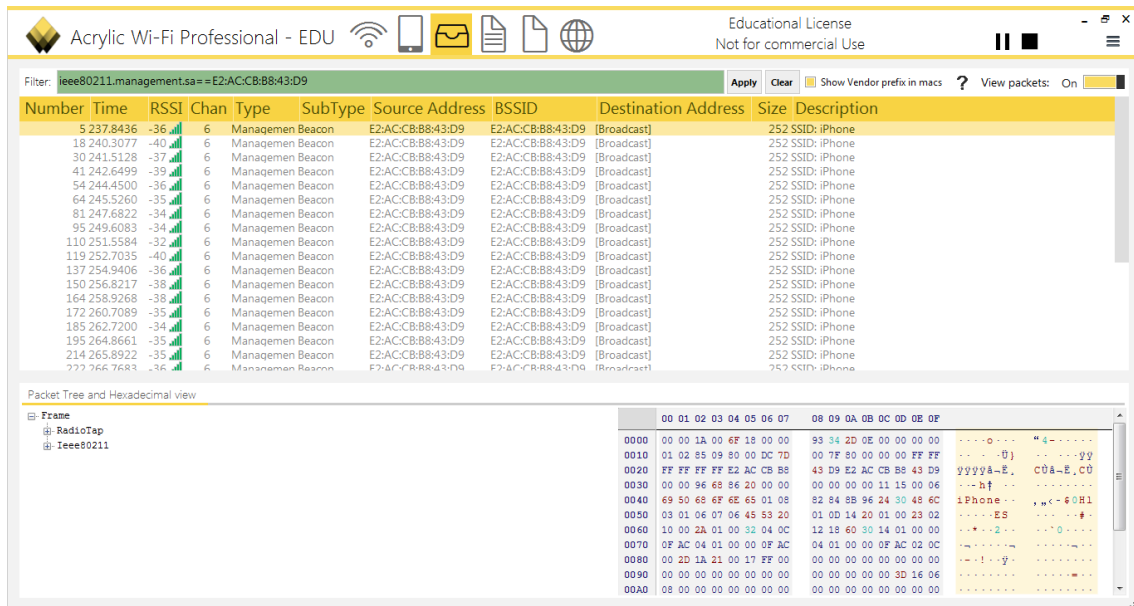


Figura 22. Captura de pantalla del filtrado por MAC en Acrylic Wi-Fi Professional.

5.4 Campañas de medida

Las medidas experimentales realizadas para este trabajo se llevaron a cabo en las zonas comunes de la tercera planta del edificio 4P de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, en la Universidad Politécnica de Valencia, cuya distribución general se puede apreciar en el plano de la Figura 23.

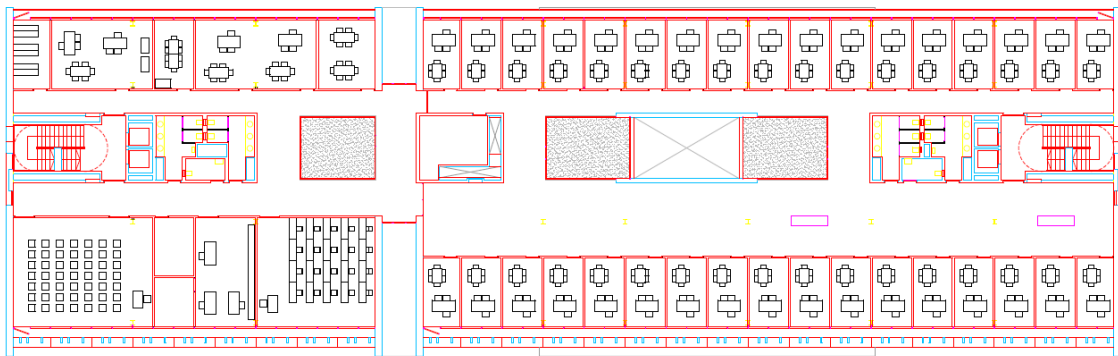


Figura 23. Plano general de la tercera planta del edificio 4P de la ETSIT.

Se desarrollaron dos campañas de medidas, cada una de ellas en diferente día. En cada una de estas campañas de medida se tomaron muestras tanto estáticas como en movimiento para diferentes entornos y distancias.

La recreación de diferentes escenarios en las campañas de medida, como los que se pueden dar en la vida real, permite la recopilación de un conjunto de datos con las que buscamos elaborar un estudio lo más completo posible del fenómeno de transmisión Wi-Fi en el canal de banda estrecha para escenarios *indoor*.

A continuación se describen detalladamente las características de los escenarios en los que se llevó a cabo la toma de datos.

5.4.1 Medidas estáticas

Durante la primera campaña se realizaron pruebas hasta en tres entornos distintos en los que se tomaron muestras a diferentes distancias. La toma de datos tenía una duración total de 100 segundos para cada una de estas distancias. Durante este periodo, se desplazaba ligeramente (10-15 cm) la mesa que soportaba los dispositivos receptores hacia los lados, hacia atrás y finalmente a su posición original, fijando la posición 20 segundos en cada desplazamiento para evitar caer en zona de desvanecimiento o *fading* y que de esta forma afectase negativamente a la toma de datos. La mesa en la que se encontraba el transmisor se mantenía desde un primer momento inmóvil.

Como se puede apreciar en la Figura 24, el proceso de desplazamiento recién descrito se realizaba para cada una de las diferentes distancias de separación (d) entre los dispositivos transmisor y receptor.

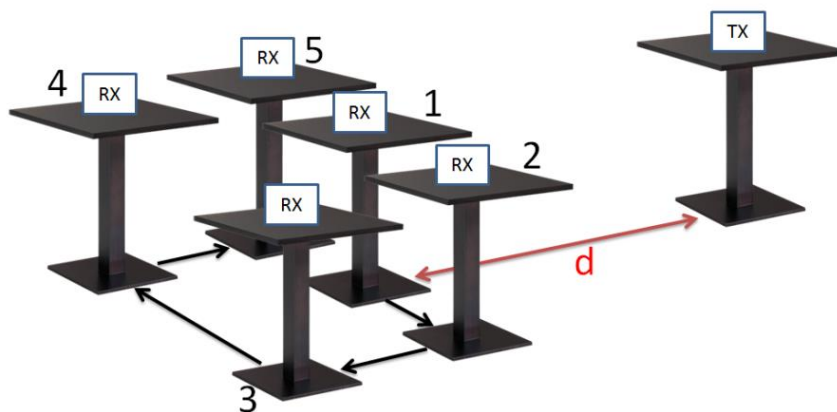


Figura 24. Desplazamientos de la mesa receptora para evitar desvanecimientos o *fading*. Elaboración propia.

A modo de resumen, los diferentes escenarios que se plantearon para analizar las características de la propagación de la señal Wi-Fi con dispositivo estáticos, fueron los siguientes:

- A. Medidas estáticas con visión directa (LOS) en un pasillo entre los dispositivos implicados a diferentes distancias.
- B. Medidas estáticas a través de un tabique y una puerta, tanto abierta como cerrada, para comparar el efecto del tabique.
- C. Medidas estáticas con la esquina de dos pasillos de por medio para estudiar el efecto de difracción de la señal.

Una vez se conocen los diferentes entornos de medida, pasamos a describir detalladamente cada uno de ellos, haciendo uso de planos en los que se ha representado la posición de los dispositivos y una serie de tablas con las distancias de separación. En los planos, el transmisor está representado por un cuadro verde, mientras que las distintas posiciones de los receptores se muestran con cuadros negros.

5.4.1.1 Escenario A: Visión directa (LOS)

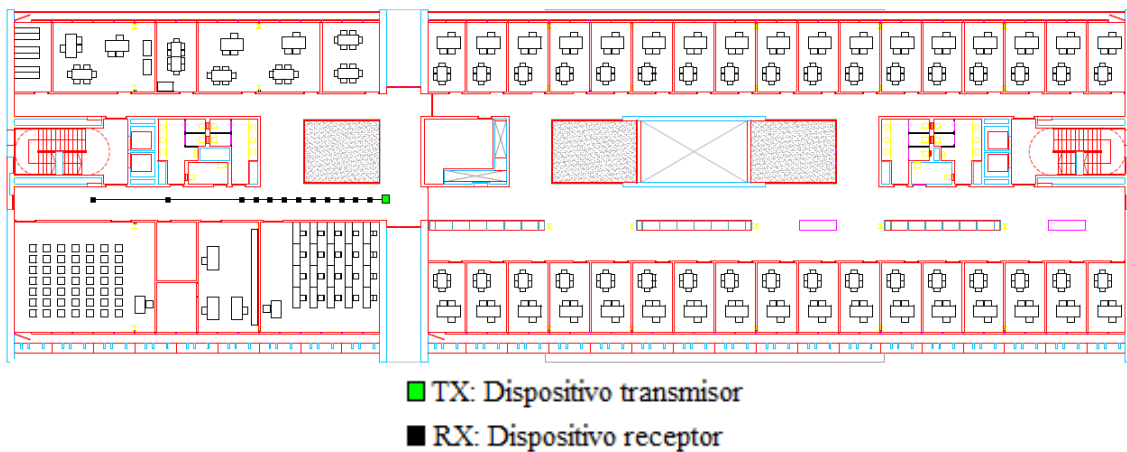


Figura 25. Plano general de la posición de los dispositivos en las medidas con visión directa (LOS).

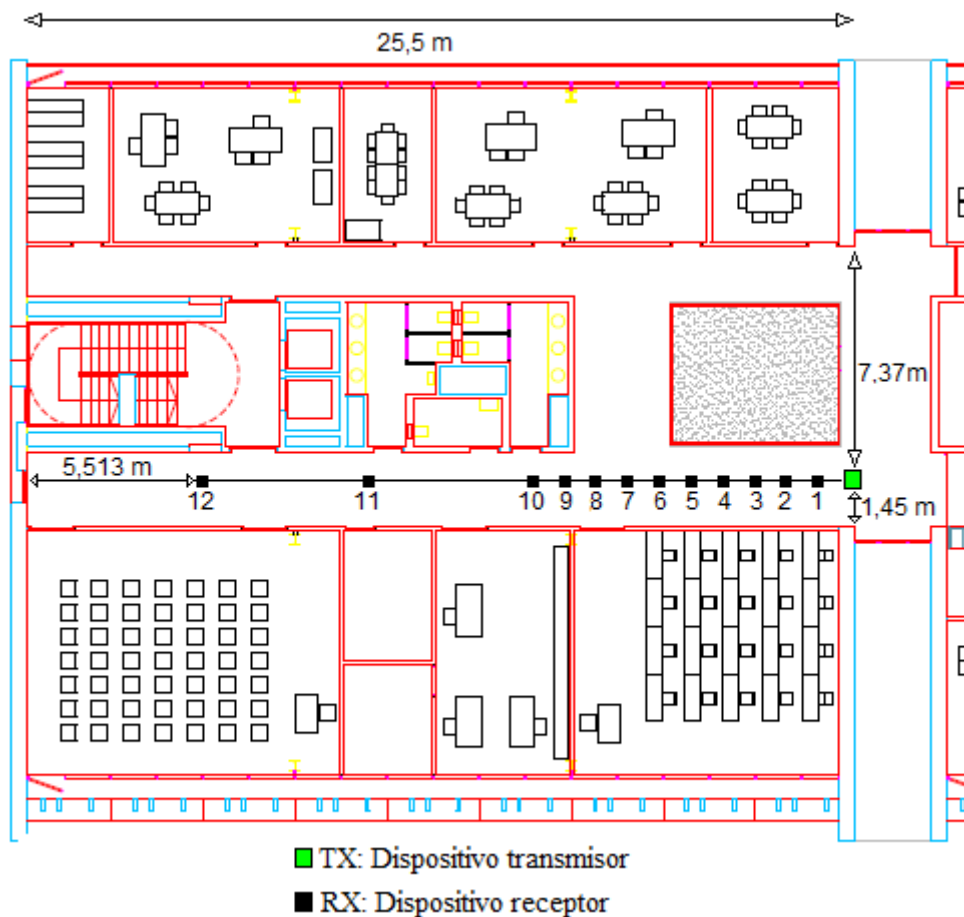


Figura 26. Plano detallado de la posición de los dispositivos en las medidas con visión directa (LOS).

Para la Figura 26, la numeración que aparece en las diferentes posiciones en las que se han situado los dispositivos receptores, hacen referencia al orden cronológico de toma de medidas que se llevó a cabo. La primera medida se realizó con el dispositivo transmisor inmóvil y los receptores en la posición 1, para la segunda medida se desplazaron los receptores a la posición 2 y así sucesivamente. Entenderemos este criterio de numeración en el resto de planos que se presenten a lo largo de la descripción de esta primera campaña de medidas.

Las distancias entre el dispositivo transmisor y los receptores para el caso del escenario con visión directa quedan resumidas en la Tabla 16:

Distancia TX-RX (m)			
d_{TX-RX1}	1,013	d_{TX-RX7}	7,054
d_{TX-RX2}	2,019	d_{TX-RX8}	8,016
d_{TX-RX3}	3	d_{TX-RX9}	9,016
d_{TX-RX4}	4,015	$d_{TX-RX10}$	9,974
d_{TX-RX5}	5,036	$d_{TX-RX11}$	14,988
d_{TX-RX6}	6,017	$d_{TX-RX12}$	19,95

Tabla 16. Distancias entre transmisor y receptor para el escenario de visión directa (LOS).

5.4.1.2 Escenario B: Sin visión directa (NLOS)

En este escenario se tomaron medidas tanto con la puerta del despacho abierta como cerrada, a las mismas distancias, con el fin de obtener el efecto del tabique sobre la señal al comparar ambos conjuntos de medidas. A continuación se detallan ambos procesos de medida:

1. Toma de medidas con la puerta del despacho cerrada y con la presencia del muro entre los dispositivos transmisor y receptor:

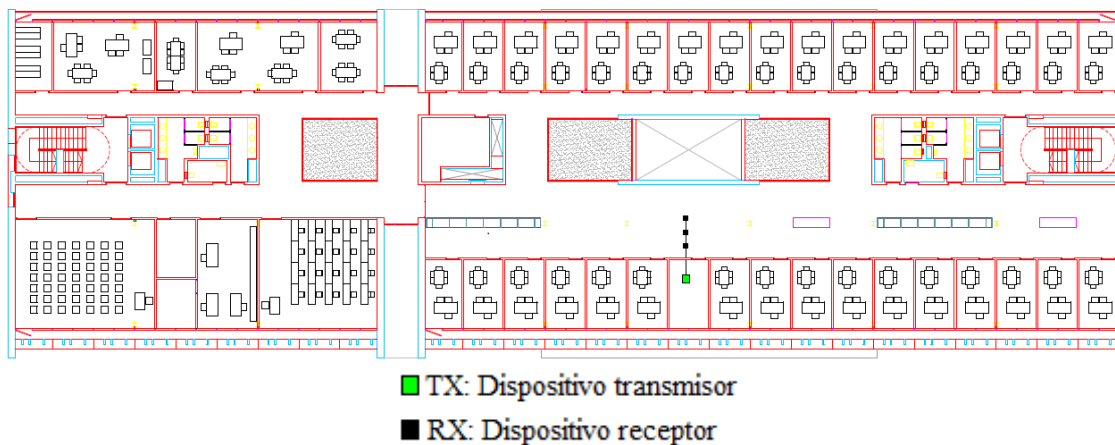


Figura 27. Plano general de la posición de los dispositivos en las medidas con la puerta cerrada y el muro del despacho de por medio.

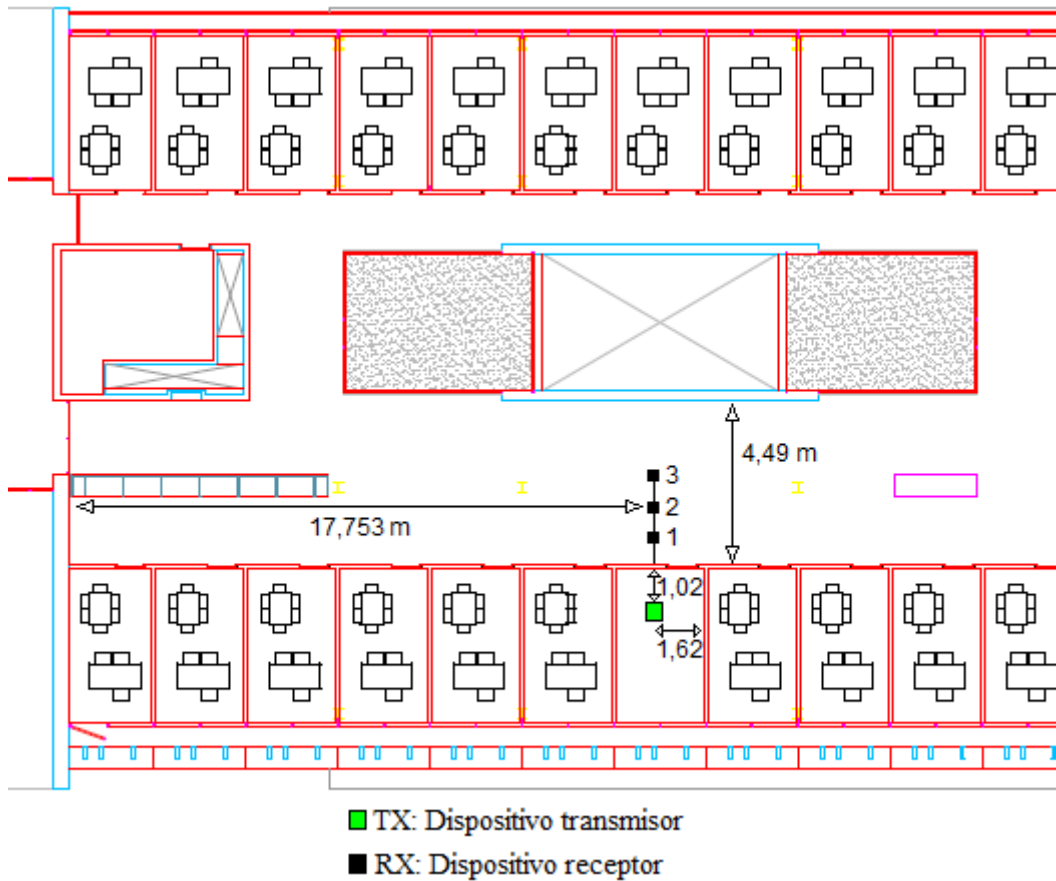


Figura 28. Plano detallado de la posición de los dispositivos en las medidas con la puerta cerrada y el muro del despacho de por medio.

En la Tabla 17 se recogen las distancias entre dispositivo transmisor y receptor para cada una de las tres posiciones en las que se sitúan los dispositivos receptores.

Distancia TX-RX (m)	
d_{TX-RX1}	1,044
d_{TX-RX2}	2,098
d_{TX-RX3}	3,02

Tabla 17. Distancias entre transmisor y receptor con la puerta cerrada y el muro del despacho de por medio.

2. Toma de medidas con la puerta del despacho abierta y con la presencia del muro entre los dispositivos transmisor y receptor:

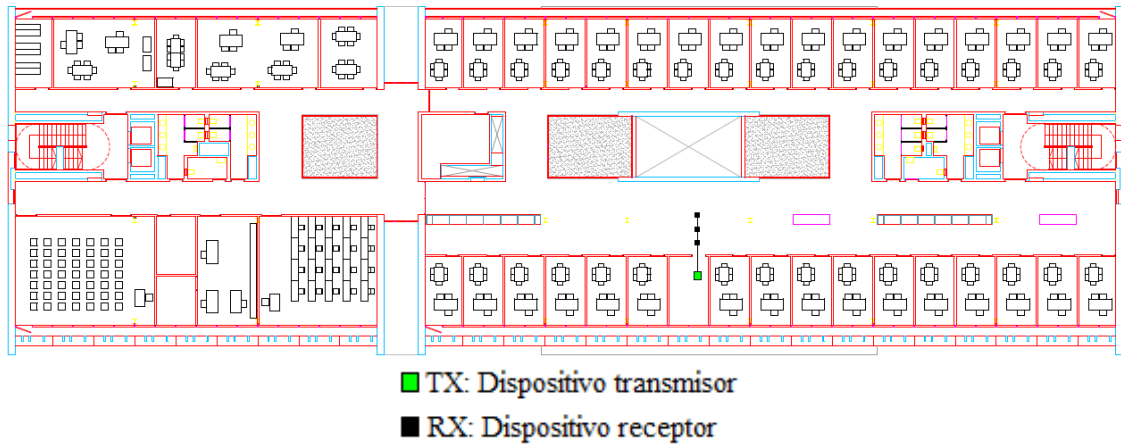


Figura 29. Plano general de la posición de los dispositivos en las medidas con la puerta abierta y el muro del despacho de por medio.

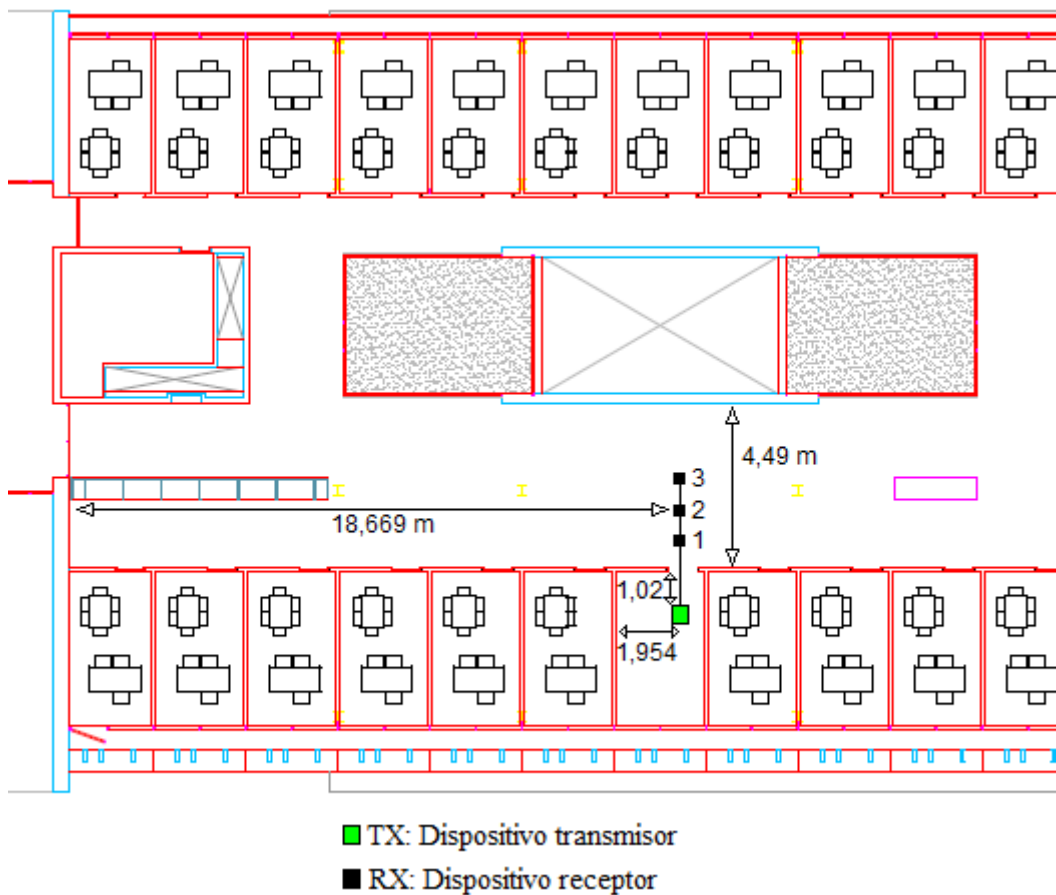


Figura 30. Plano detallado de la posición de los dispositivos en las medidas con la puerta abierta y el muro del despacho de por medio.

Se ha buscado que las distancias de separación para el caso de la puerta abierta sean prácticamente idénticas a las distancias con la puerta cerrada, como podemos ver en la Tabla 18.

Distancia TX-RX (m)	
d_{TX-RX1}	1
d_{TX-RX2}	1,963
d_{TX-RX3}	2,97

Tabla 18. Distancias entre transmisor y receptor con la puerta abierta y el muro del despacho de por medio.

5.4.1.3 Escenario C: Difracción

A diferencia de las medidas anteriores, en las que se estudiaba la propagación con visión directa y a través de un tabique, en este caso se propuso estudiar el efecto de difracción de la esquina de una pared. El efecto de difracción es un fenómeno importante y muy a tener en cuenta en la propagación de señales.

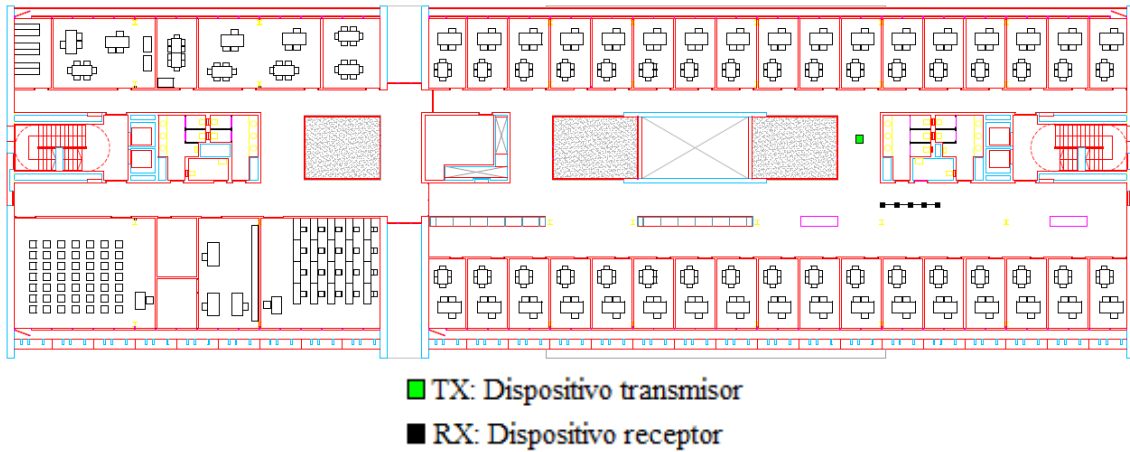


Figura 31. Plano general de la posición de los dispositivos en las medidas del efecto de difracción.

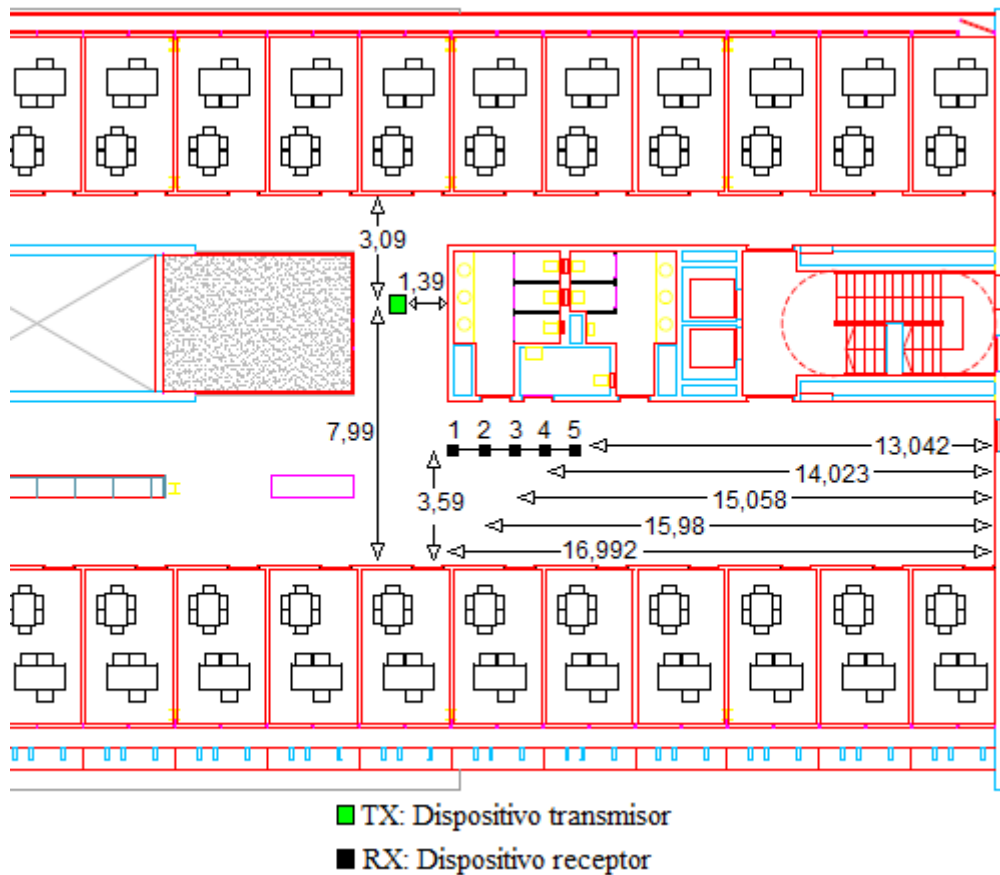


Figura 32. Plano detallado de la posición de los dispositivos en las medidas del efecto de difracción.

A diferencia de las distancias tomadas en los escenarios anteriores, las distancias entre transmisor y receptores en este escenario de difracción, plasmadas en la Tabla 19, hacen referencia a la distancia en diagonal (obviando las estancias/tabiques existentes de por medio).

Distancia TX-RX (m)	
d_{TX-RX1}	4,6095
d_{TX-RX2}	5,0085
d_{TX-RX3}	5,51
d_{TX-RX4}	6,19
d_{TX-RX5}	6,916

Tabla 19. Distancias en diagonal entre transmisor y receptor para el escenario de difracción.

5.4.2 Medidas dinámicas

La segunda campaña de medidas consistió en la realización de una serie de pruebas en visión directa (LOS) pero con los dispositivos en movimiento. Concretamente se realizaron cuatro pruebas, todas ellas en la misma localización, con diferentes movimientos, distancias y procesos de medida. A diferencia de la primera campaña de medidas, ahora sólo se utilizaría el dispositivo transmisor *iPhone 6* y el receptor *bq Aquaris M5*, los cuales son portados por dos personas en los bolsillos de su ropa durante todos los procesos de medida.

A modo de resumen, los procesos llevados a cabo para la toma de medidas son los siguientes:

- A. Acercamiento de los dispositivos transmisor y receptor, con pausas de 20 segundos en determinadas posiciones.
- B. Acercamiento con un movimiento constante a razón de $\frac{1}{2}$ m/s.
- C. Distanciamiento con pausas de 20 segundos en determinadas posiciones.
- D. Distanciamiento con un movimiento constante a razón de $\frac{1}{2}$ m/s.

Como ya se hizo para la primera campaña de medidas, a continuación se va a describir detalladamente con los planos y tablas de distancias pertinentes los diferentes escenarios de la segunda campaña de medidas:

5.4.2.1 Escenario A: Acercamiento

- A. *Acercamiento con pausas*

Este primer escenario de medidas tiene ciertas similitudes con los escenarios vistos en la primera campaña, pues consiste en tomar datos a diferentes distancias durante un determinado tiempo. La particularidad de estas medidas es que se podrán comparar con las mediciones realizadas en movimiento constante ya que ambas se llevan a cabo en el mismo escenario y abarcan las mismas distancias.

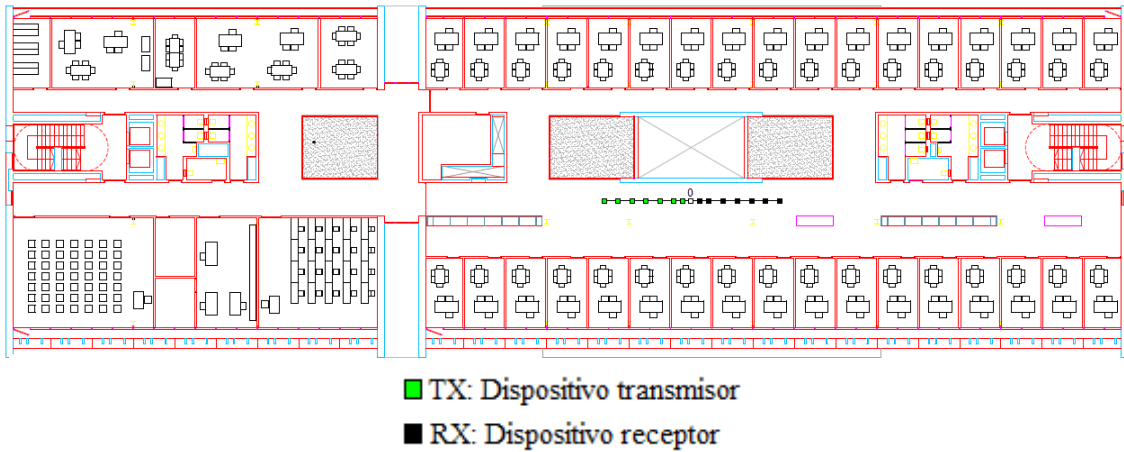


Figura 33. Plano general de la posición de los dispositivos en las medidas de acercamiento con pausas.

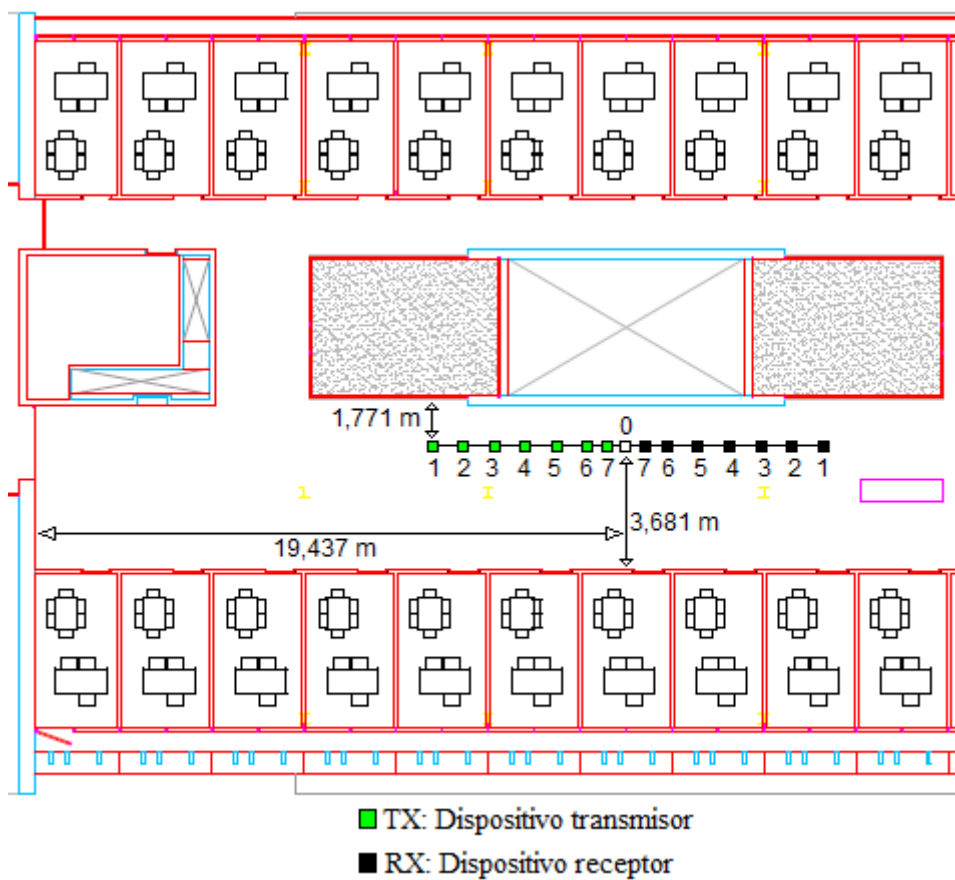


Figura 34. Plano detallado de la posición de los dispositivos en las medidas de acercamiento con pausas.

La numeración establecida en el plano de la Figura 34 atiende al orden en el que se ha realizado la toma de muestras. Para el primer caso, tanto el dispositivo transmisor como los receptores se colocaban en sus respectivas posiciones 1, para el segundo caso se establecían en las posiciones 2 y así sucesivamente se iban acercando hasta finalizar ambos en sus posiciones 7.

Las distancias entre los dispositivos en cada una de las posiciones fijadas en la Figura 34 quedan recogidas en la Tabla 20.

Distancia TX-RX (m)	
$d_{TX1-RX1}$	12,056
$d_{TX2-RX2}$	9,954
$d_{TX3-RX3}$	8,03
$d_{TX4-RX4}$	6,024
$d_{TX5-RX5}$	4,005
$d_{TX6-RX6}$	1,982
$d_{TX7-RX7}$	0,8

Tabla 20. Distancias medidas para el escenario de acercamiento con pausas.

B. Acercamiento continuo

Esta medida, a diferencia de todas las hechas hasta el momento, se caracteriza por no tomar datos en posiciones fijas ya que durante el proceso de medición los dispositivos están en continuo movimiento. Estamos hablando de una velocidad de desplazamiento de $\frac{1}{2}$ m/s (1,8 km/h), menor que el ritmo medio al caminar de una persona (5km/h).

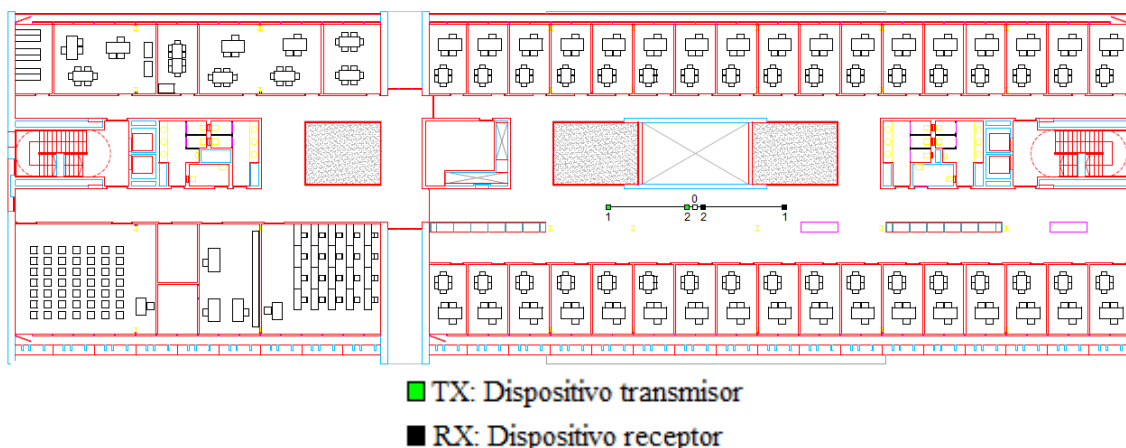


Figura 35. Plano general de la posición de los dispositivos en las medidas de acercamiento sin pausas.

Mediante la numeración de la Figura 36 podemos entender de qué forma se realizó el acercamiento. Las posiciones iniciales de los dispositivos se establecen en los puntos 1 y se realiza el acercamiento continuado a la velocidad establecida hasta llegar a las posiciones 2. Las distancias al principio y al final del proceso las encontramos en la siguiente tabla:

Distancia TX-RX (m)	
$d_{TX1-RX1}$	12,056
$d_{TX2-RX2}$	0,8

Tabla 21. Distancias medidas para el escenario de acercamiento sin pausas.

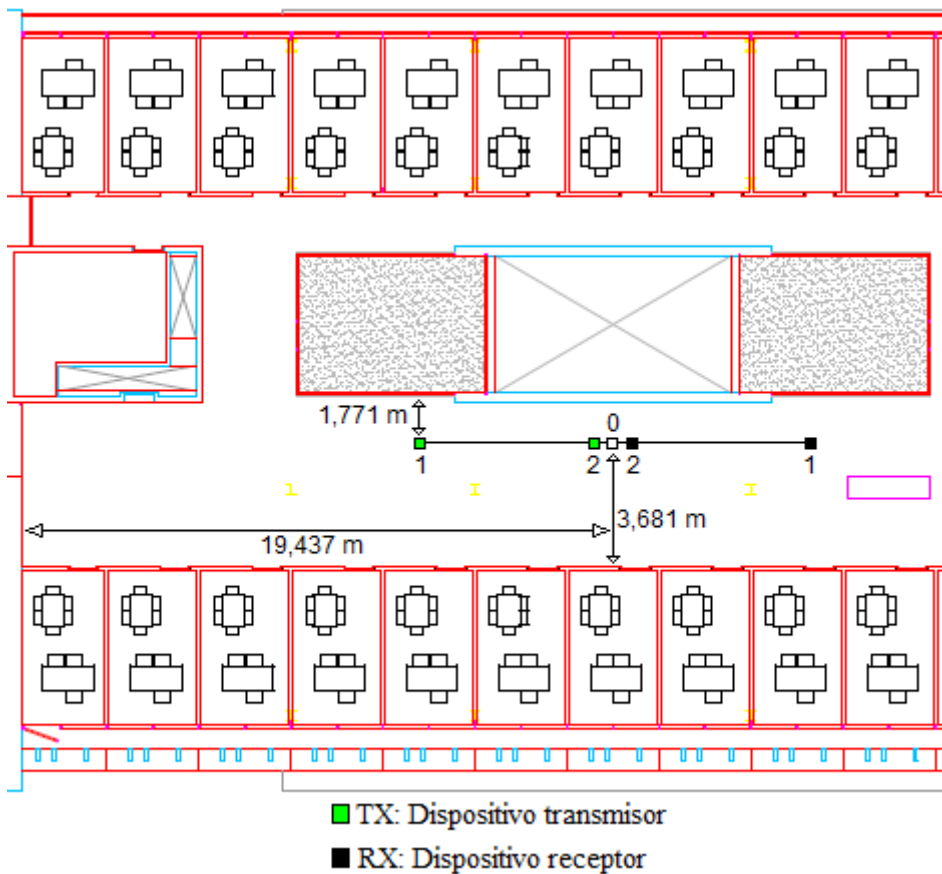


Figura 36. Plano detallado de la posición de los dispositivos en las medidas de acercamiento sin pausas.

5.4.2.2 Escenario B: Distanciamiento

A. Distanciamiento con pausas

El proceso seguido es idéntico al llevado a cabo en las medidas de acercamiento con pausas. La única diferencia es que el recorrido es a la inversa, se comienza en las posiciones más cercanas para acabar en los puntos más lejanos.

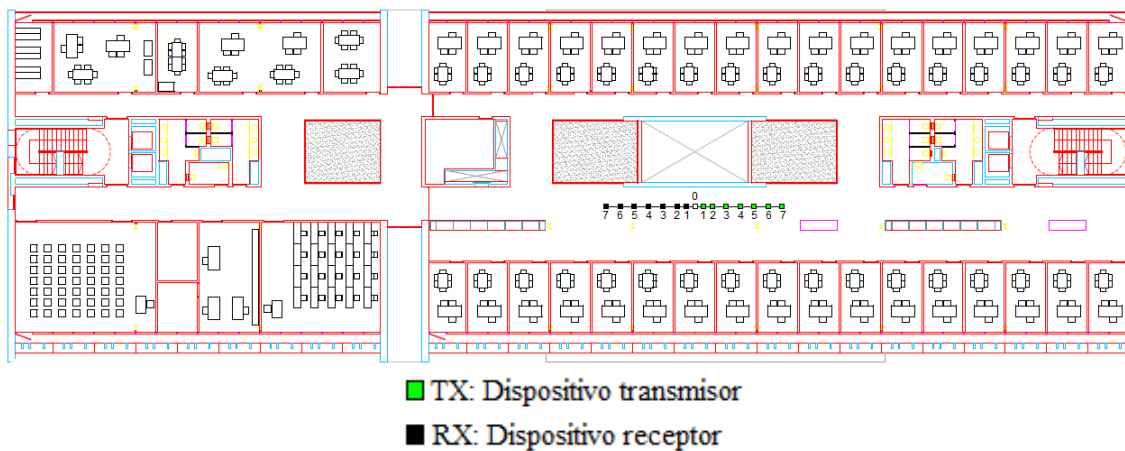


Figura 37. Plano general de la posición de los dispositivos en las medidas de distanciamiento con pausas.

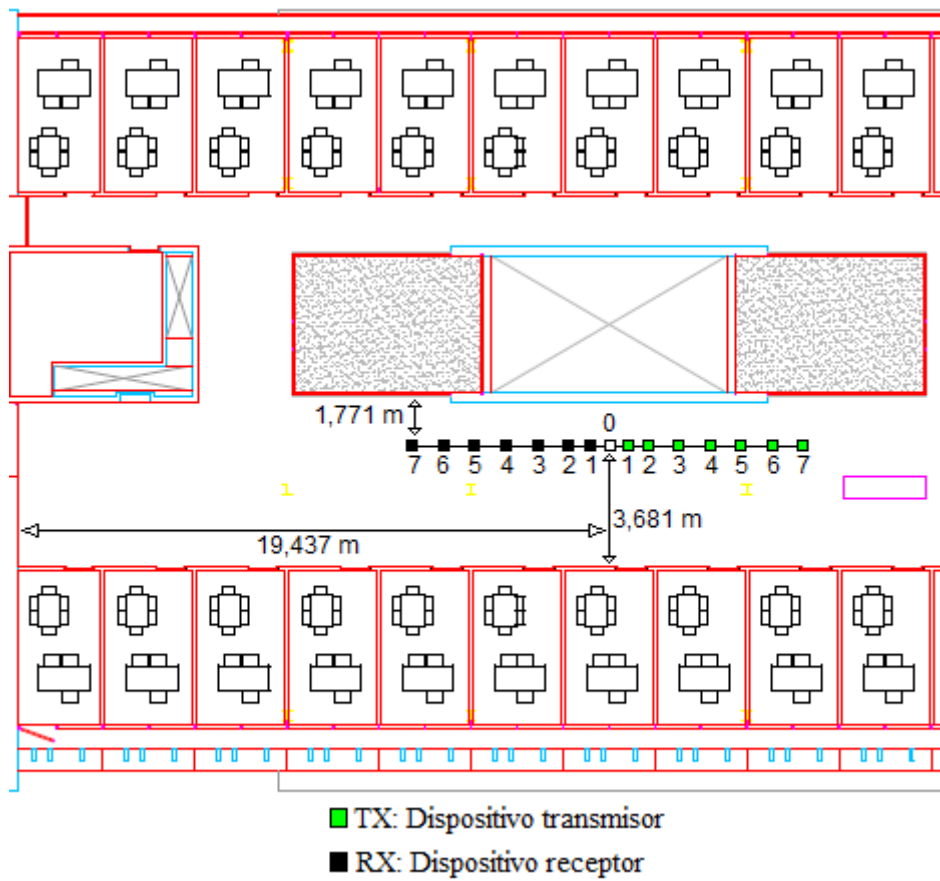


Figura 38. Plano detallado de la posición de los dispositivos en las medidas de distanciamiento con pausas.

El criterio de numeración seguido para este caso es idéntico al explicado para el caso del acercamiento con pausas, empezando en las posiciones 1 y acabando en las posiciones 7. Las distancias también se mantienen.

Distancia TX-RX (m)	
$d_{TX1-RX1}$	0,8
$d_{TX2-RX2}$	1,982
$d_{TX3-RX3}$	4,005
$d_{TX4-RX4}$	6,024
$d_{TX5-RX5}$	8,03
$d_{TX6-RX6}$	9,954
$d_{TX7-RX7}$	12,056

Tabla 22. Distancias medidas para el escenario de distanciamiento con pausas.

B. Distanciamiento continuo

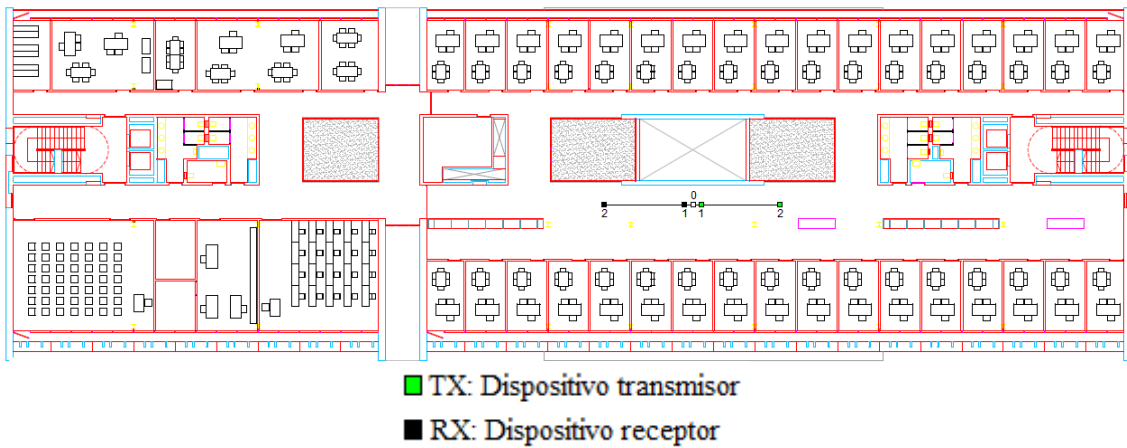


Figura 39. Plano general de la posición de los dispositivos en las medidas de distanciamiento sin pausas.

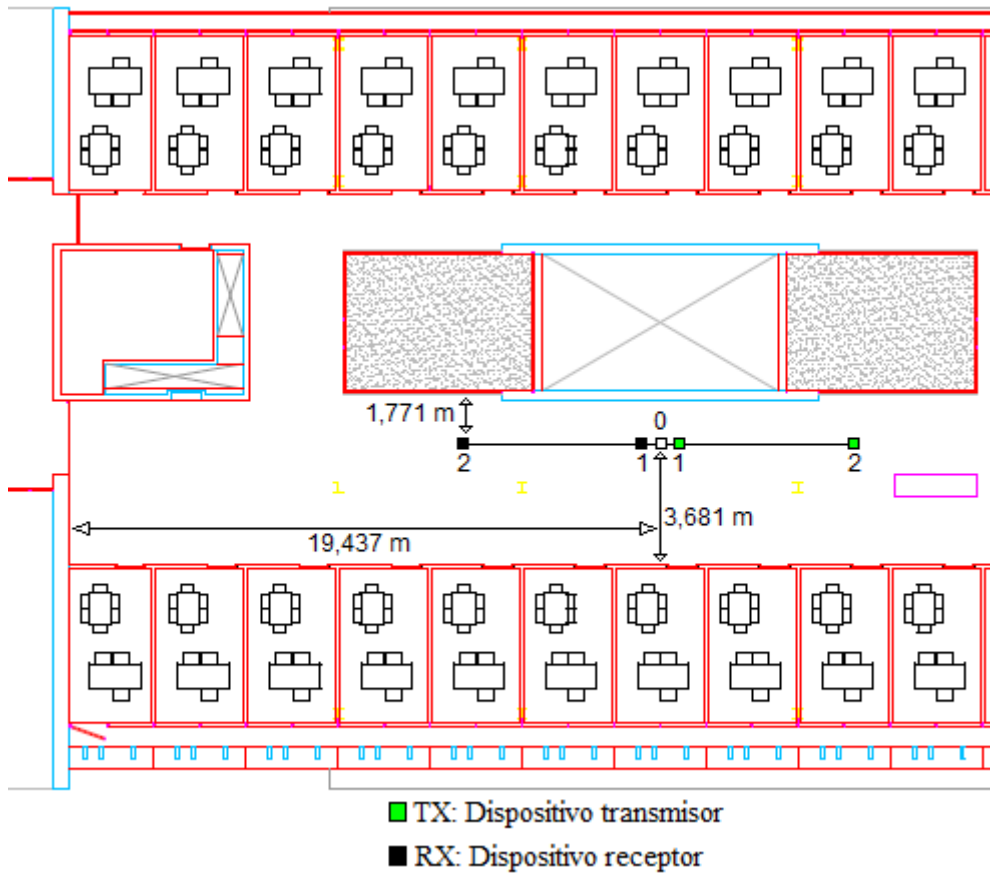


Figura 40. Plano detallado de la posición de los dispositivos en las medidas de distanciamiento sin pausas.

Este último escenario de medidas es el inverso al acercamiento sin pausa. De nuevo se toman datos en continuo movimiento con las mismas separaciones, como refleja la Figura 40, partiendo de las posiciones 1 y finalizando en las posiciones 2.

Distancia TX-RX (m)	
$d_{TX1-RX1}$	0,8
$d_{TX2-RX2}$	12,056

Tabla 23. Distancias medidas para el escenario de distanciamiento sin pausas.

Capítulo 6. Análisis de resultados

A lo largo de este capítulo se comentarán los resultados gráficos de los análisis de las medidas realizadas para cada uno de los escenarios expuestos en el apartado anterior del trabajo.

Mediante *Matlab* se han representado y comparado gráficamente tanto las rectas que modelan las muestras obtenidas en las medidas, como aquellas rectas que representan los diferentes modelos experimentales de propagación explicados detalladamente en el Capítulo 4. Es importante recordar que cada uno de estos modelos de propagación dependía de una serie de parámetros que variaban en función del entorno en el que se realizaba la medida (LOS, NLOS, difracción, etc.). El *Script* básico creado en *Matlab* para el análisis de los datos se adjunta en el Anexo I.

6.1 Medidas estáticas

Como ya se ha comentado en el capítulo anterior, la primera campaña de medidas constó de una serie de pruebas con los dispositivos estáticos en diferentes escenarios con las que se buscaba estimar las pérdidas totales del enlace entre transmisor y receptores. En los siguientes apartados se analizarán, para cada escenario (Escenarios A, B y C), los resultados que desprenden los datos captados por nuestros dispositivos receptores y el *software* del que hacen uso, lo cual se traduce en la obtención de una gráfica de resultados de cada receptor para cada uno de los escenarios.

6.1.1 Escenario A: Visión directa (LOS)

En las Figuras 41 y 42 se han representado las rectas que modelan tanto las medidas tomadas en las pruebas como los modelos de propagación teóricos, además de las pérdidas en espacio libre (L_{FS} (dB)), para el entorno de visión directa (LOS) y para ambos dispositivos receptores.

Con respecto a las rectas que modelan las pérdidas totales del enlace de nuestro entorno de medida destacaremos dos características importantes. La primera de ellas sería su pendiente, y es que en ambas representaciones presentan un valor muy similar aunque bastante bajo, por debajo incluso de la pendiente de las pérdidas en espacio libre, como queda recogido en la Tabla 24. El segundo aspecto importante tiene relación con el valor de las pérdidas. Podemos ver como la recta de pérdidas en el enlace para el receptor móvil *bq Aquaris M5* presenta unos valores aproximadamente 10 dB por encima de la recta para el receptor *Acer Aspire 5575G*.

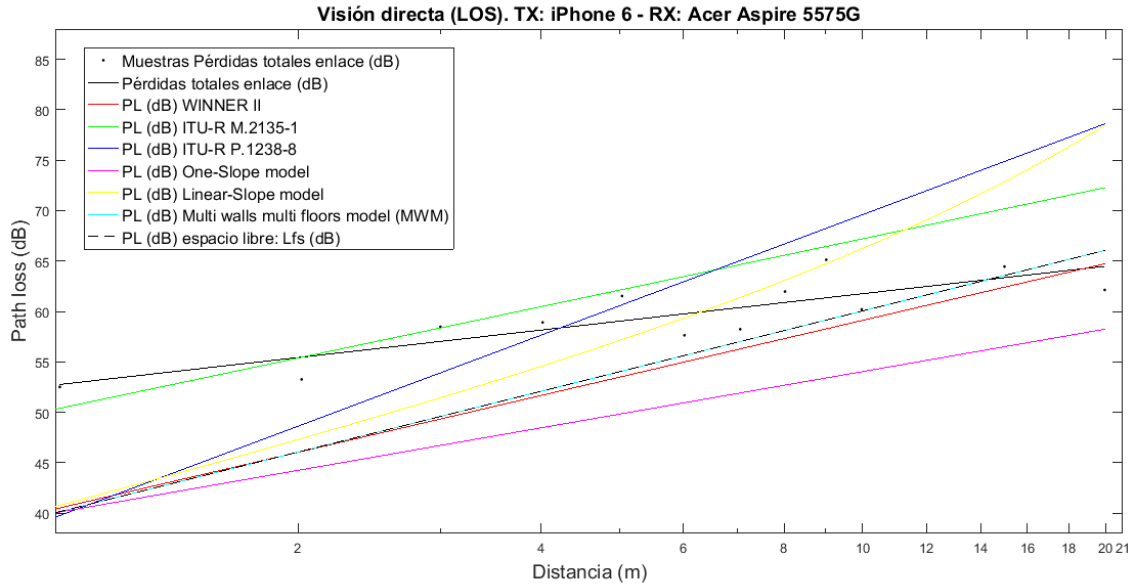


Figura 41. Representación gráfica de las pérdidas del enlace y de los modelos teóricos de propagación en el escenario de visión directa para el receptor Acer Aspire 5575G.

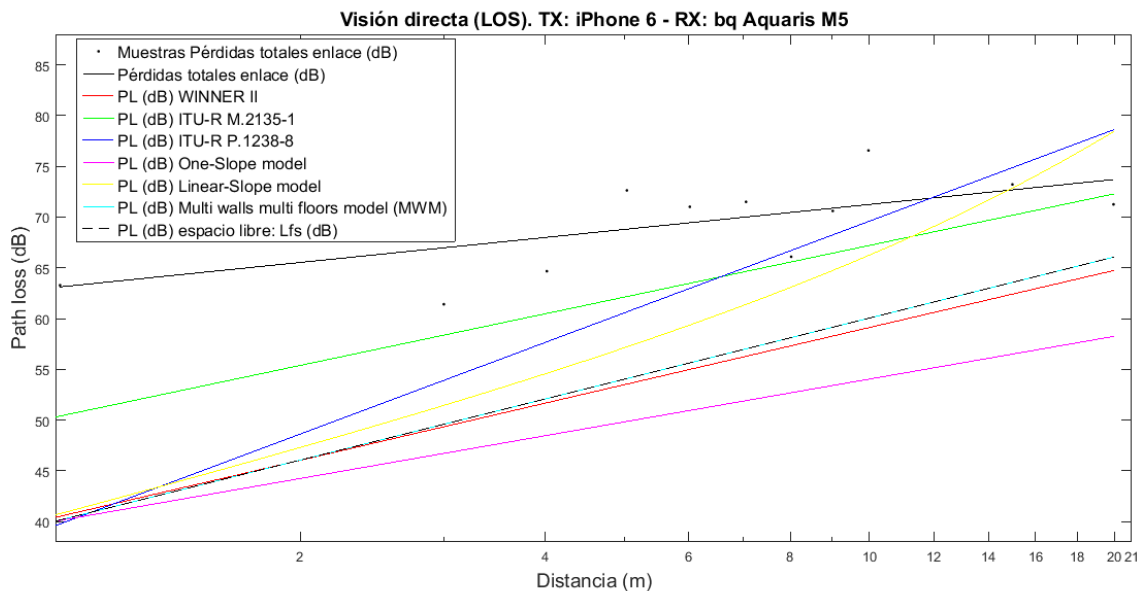


Figura 42. Representación gráfica de las pérdidas del enlace y de los modelos teóricos de propagación en el escenario de visión directa para el receptor bq Aquaris M5.

En la Tabla 24 se ha resumido el valor de la pendiente para cada una de las rectas representadas en las figuras anteriores. Este valor de pendiente es importante porque nos ayuda a detectar cual es el modelo de propagación teórico que más se aproxima a la recta de pérdidas obtenida en las medidas.

El valor de la pendiente varía en función del modelo de propagación y de los parámetros que se escojan para el mismo, pues como ya se explicó en el Capítulo 4, en función del escenario en el que se realicen las medidas, se tendrán unos parámetros teóricos u otros.

De entre todos los modelos teóricos, ITU-R M2135-1 y *One-Slope model* presentan los valores de pendiente (1,69 y 1,4 respectivamente) más parecidos a los dados por las rectas de

medidas, por lo que diremos que estos son los modelos que más se aproximan a la tendencia de la recta de medidas.

Recta	Pendiente	
	TX: iPhone 6	
	RX: Acer Aspire 5575G	RX: bq Aquaris M5
Pérdidas totales enlace (dB)	0,9050	0,8171
PL (dB) WINNER II	1,87	
PL (dB) ITU-R M2135-1	1,69	
PL (dB) ITU-R P1238-8	3	
PL (dB) One-Slope model	1,4	
PL (dB) Linear-Slope model	3,035	
PL (dB) Multi walls multi floors model (MWM)	2	
Pérdidas espacio libre: L_{FS} (dB)	2	

Tabla 24. Pendiente de la recta de pérdidas en el enlace y de los modelos de propagación teóricos para el escenario de visión directa.

6.1.2 Escenario B: Sin visión directa (NLOS)

El segundo escenario buscaba estudiar el efecto de la presencia de un muro arquitectónico en la trayectoria de la comunicación. Para ello se escogió un tabique con puerta para poder contrastar la incidencia que sobre la señal tenía que dicha puerta estuviese abierta o cerrada, además del efecto del propio tabique. Para cada uno de los receptores se obtuvieron una serie de resultados, los cuales están plasmados en las Figuras 43 y 44.

Centrándonos en primer lugar en las rectas de pérdidas del enlace representadas en la Figura 43, para el receptor *Acer Aspire 5575G*, salta a la vista que el efecto del muro y la puerta cerrada producen unas pérdidas en torno a 1-2 dB mayores que las que se dan con la puerta abierta. Por otro lado, los valores de las pendientes para ambas rectas de medidas son muy similares aunque tienen un valor bajo, como ya pasara con los valores de pendiente para este mismo receptor en el Escenario A.

De la Tabla 25, donde están resumidos los valores de las pendientes en este escenario, identificamos *One-Slope model* con pendiente 1,4 como el modelo de propagación que más se asemeja a la forma de las rectas que representan las pérdidas de las medidas.

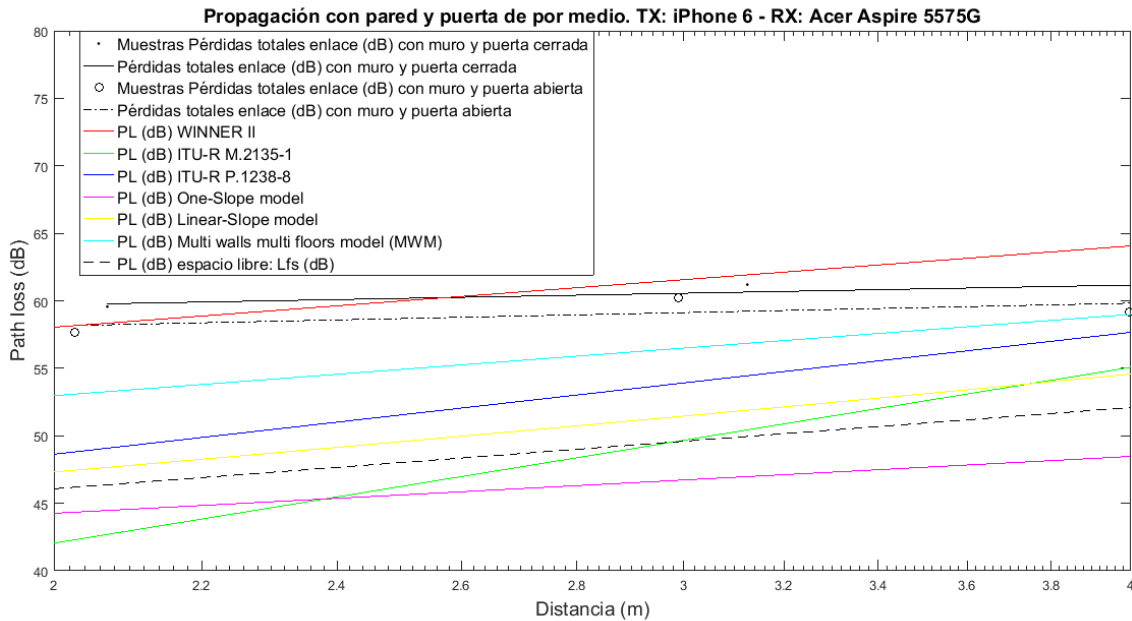


Figura 43. Representación gráfica de las pérdidas del enlace y de los modelos teóricos de propagación en el escenario sin visión directa para el receptor *Acer Aspire 5575G*.

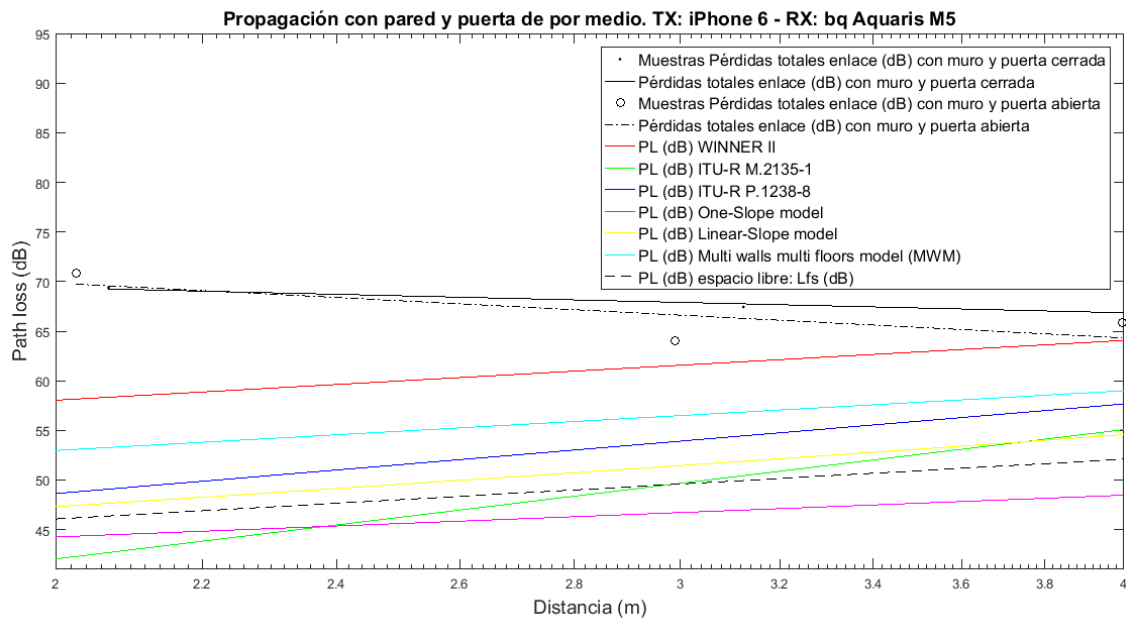


Figura 44. Representación gráfica de las pérdidas del enlace y de los modelos teóricos de propagación en el escenario sin visión directa para el receptor *bq Aquaris M5*.

En referencia a la Figura 44, en la que se representan las rectas de pérdidas para el enlace con el receptor *bq Aquaris M5*, se dan varios fenómenos característicos que se comentan a continuación.

En primer lugar destaca su pendiente, y es que a diferencia de los visto hasta ahora presenta un valor negativo, independientemente de si la puerta está abierta o cerrada. Este hecho puede venir causado por errores en las medidas, lo cual no sería raro en trabajos experimentales como el que nos ocupa. Un valor de pendiente negativa implica mayores pérdidas a menores distancias.

Otro de los aspectos a destacar tiene relación con los niveles de pérdidas. A diferencia de lo que ocurría en este mismo escenario para el receptor *Acer Aspire 5575G* donde la diferencia entre las rectas de pérdidas con la puerta abierta y cerrada se mantenía en 1-2 dB, aquí no se aprecia una continuidad con la distancia, por lo que no se puede establecer claramente, para el receptor *bq Aquaris M5*, la incidencia del muro sobre la señal.

Recta	Pendiente	
	TX: <i>iPhone 6</i>	
	RX: <i>Acer Aspire 5575G</i>	RX: <i>bq Aquaris M5</i>
Pérdidas totales enlace (dB) con muro y puerta cerrada	0,4843	-0,8391
Pérdidas totales enlace (dB) con muro y puerta abierta	0,5599	-1,8360
PL (dB) WINNER II	2	
PL (dB) ITU-R M2135-1	4,33	
PL (dB) ITU-R P1238-8	3	
PL (dB) One-Slope model	1,4	
PL (dB) Linear-Slope model	2,4139	
PL (dB) Multi walls multi floors model (MWM)	2	
Pérdidas espacio libre: L_{FS} (dB)	2	

Tabla 25. Pendiente de las rectas de pérdidas en el enlace y de los modelos de propagación teóricos para el escenario sin visión directa.

6.1.3 Escenario C: Difracción

El último entorno para la toma de datos con dispositivos estáticos tiene como objetivo analizar el efecto que sobre la señal tiene la difracción producida por la esquina de una pared entre dos pasillos.

En las Figuras 45 y 46 se han representado, al igual que para los escenarios anteriores, las rectas de pérdidas obtenidas a partir de las medidas realizadas en el escenario en cuestión y las rectas que modelan los distintos modelos de propagación experimentales. En este caso no se pueden comparar las rectas de pérdidas en el enlace con todos los modelos de propagación analizados en los Escenarios A y B. Los modelos *WINNER II* y *Multi walls multi floors model (MWM)*, los cuales presentan parámetros dependientes del número de muros que separan los dispositivos de medida, han sido desestimados para el estudio del Escenario C ya que al ser una esquina y no un tabique como tal el que separa los dispositivos, la forma en la que modelarían el escenario no sería la adecuada.

Ambas figuras presentan rectas de pérdidas en el enlace con un valor grande de pendiente en comparación con los vistos hasta el momento. Para situaciones sin visión directa como podría ser ésta del Escenario C, los valores de pérdidas son normalmente mayores que en situaciones de visión directa. Además, como ya se ha visto en los resultados del Escenario A, los valores de pérdidas en el enlace para el receptor *bq Aquaris M5* son de media uno 10 dB mayores que en el caso del receptor *Acer Aspire 5575G*. Aunque se desconoce el valor de ganancia de los dispositivos receptores, la posibilidad de que dichos parámetros sean distintos explicaría el suceso.

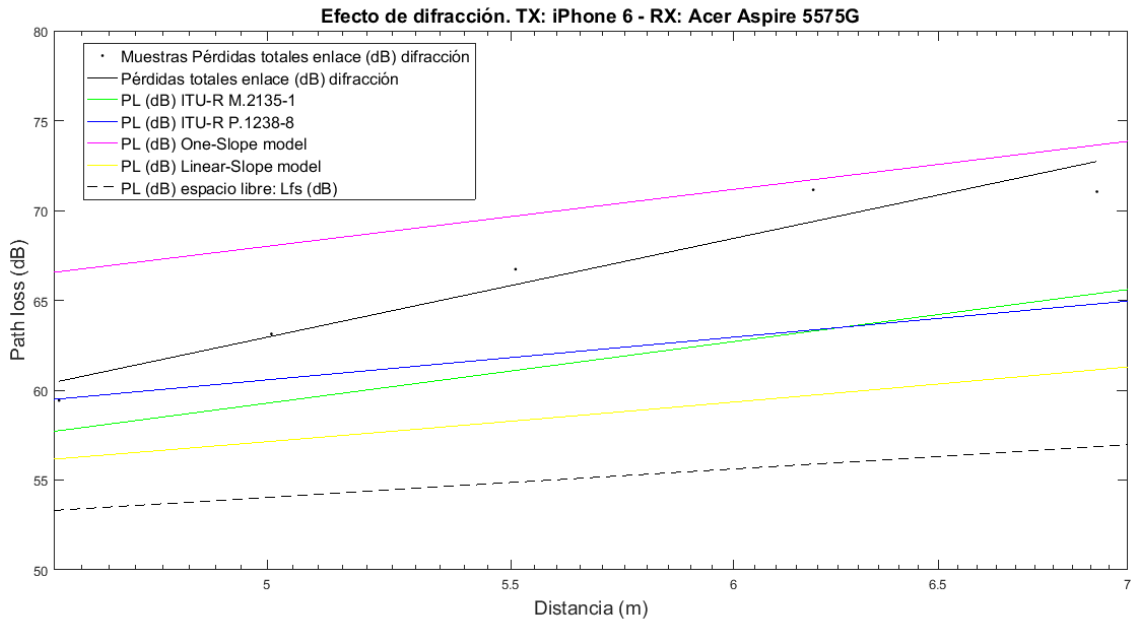


Figura 45. Representación gráfica de las pérdidas del enlace y de los modelos teóricos de propagación en el escenario de difracción para el receptor *Acer Aspire 5575G*.

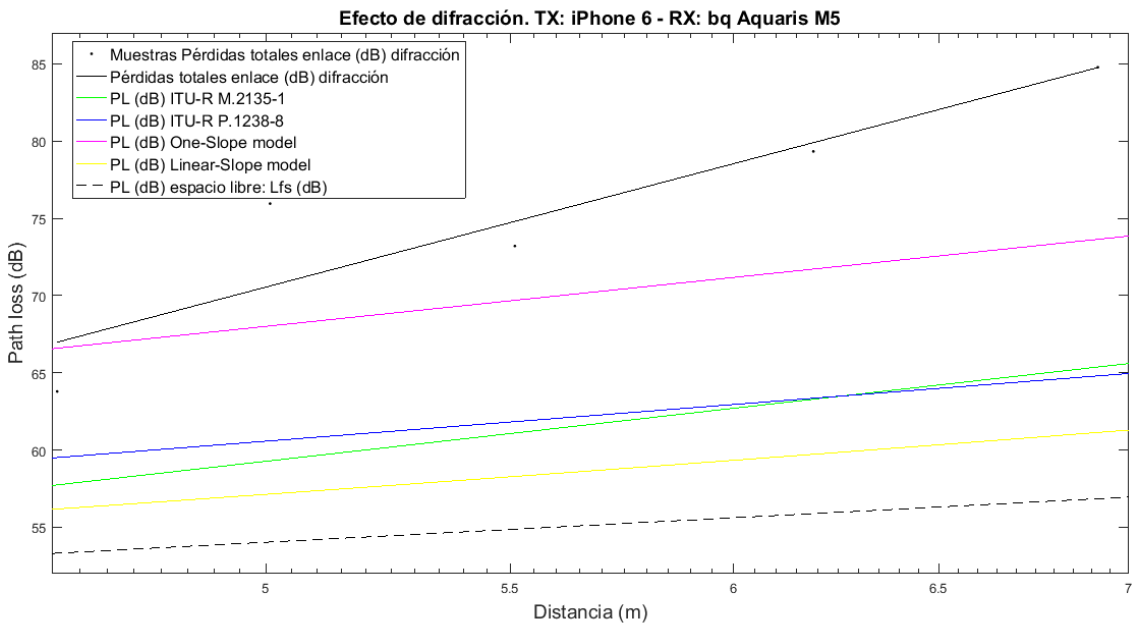


Figura 46. Representación gráfica de las pérdidas del enlace y de los modelos teóricos de propagación en el escenario de difracción para el receptor *bq Aquaris M5*.

Con respecto a los valores de las pendientes en el Escenario C, plasmados en esta ocasión en la Tabla 26, serían nuevamente ITU-R M2135-1 y *One-Slope model* los modelos de propagación teóricos cuyos valores de pendiente más se asemejan a los obtenidos de las rectas de pérdidas en el enlace para ambos dispositivos receptores.

Recta	Pendiente	
	TX: iPhone 6	
	RX: Acer Aspire 5575G	RX: bq Aquaris M5
Pérdidas totales enlace (dB)	6,9443	10,0861
PL (dB) ITU-R M2135-1	4,33	
PL (dB) ITU-R P1238-8	3	
PL (dB) One-Slope model	4	
PL (dB) Linear-Slope model	2,8177	
Pérdidas espacio libre: L_{FS} (dB)	2	

Tabla 26. Pendiente de las rectas de pérdidas en el enlace y de los modelos de propagación teóricos para el escenario de difracción.

6.2 Medidas dinámicas

Se plantearon dos escenarios de medidas dinámicas: acercamiento y distanciamiento, analizando en ambos el comportamiento de las pérdidas mediante un desplazamiento continuo y con pausas. Para éstas medidas se hizo uso únicamente del dispositivo receptor *bq Aquaris M5*. Tanto el dispositivo transmisor como el receptor eran portados por dos personas durante la realización de las pruebas, y en ningún momento se interpuso muro alguno en la comunicación. En el Capítulo 5 se realizó una explicación detallada de todos los procesos de medida seguidos.

6.2.1 Escenario A: Acercamiento

El primero de los escenarios de medida dinámicos consistió en un acercamiento de los dispositivos transmisor y receptor. Dicho acercamiento se llevó a cabo en primer lugar mediante un movimiento continuo y posteriormente realizando una serie de pausas.

Para analizar los resultados de las medidas dinámicas, al igual que se ha hecho para las medidas estáticas, se van a comparar las rectas de las pérdidas del enlace, con y sin pausas, con los distintos modelos de propagación teóricos.

En la Figura 47 se han representado las rectas de pérdidas totales en el enlace, tanto para el acercamiento continuo como con pausas, así como los modelos de propagación teóricos con los que ya veníamos tratando.

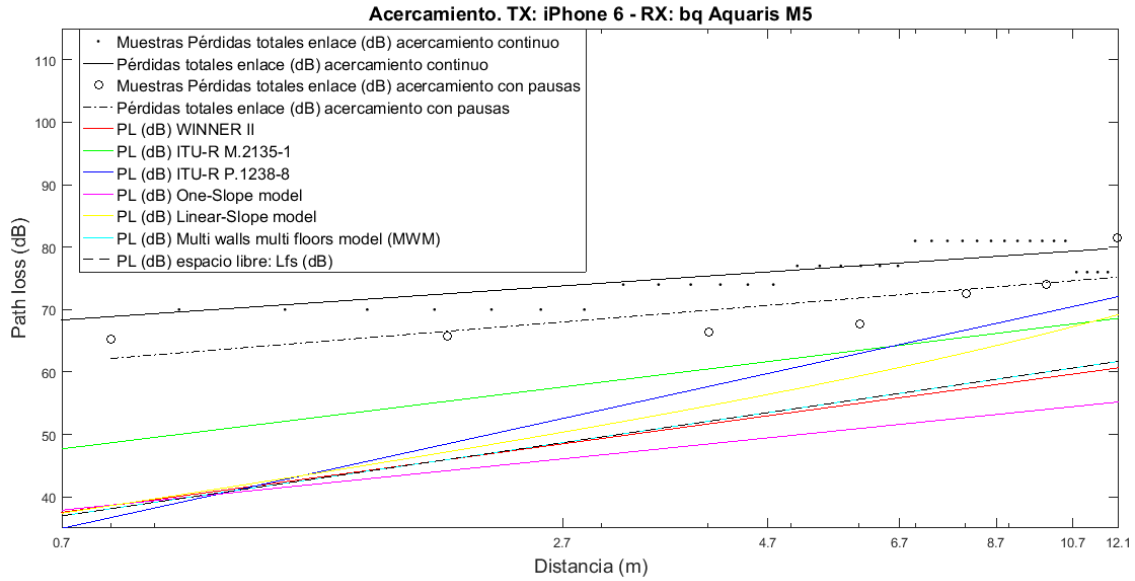


Figura 47. Representación gráfica de las pérdidas del enlace y de los modelos teóricos de propagación en el escenario de acercamiento.

De la figura anterior extraemos como resultado que las pérdidas en el enlace debidas al acercamiento continuo de los dispositivos son de media unos 5 dB mayores que las pérdidas derivadas del acercamiento con pausas.

En la Tabla 27 se ha registrado el valor de la pendiente de cada una de las rectas representadas en la Figura 47. En dicha tabla podemos ver como las rectas de pérdidas obtenidas a partir de los procesos de acercamiento, tanto continuo como con pausas, presentan unos valores de pendiente muy similares entre ellos. Además, sería el modelo *One-Slope model* el que muestra el valor de pendiente más parecido y por tanto sería el modelo de propagación teórico que mejor se ajustaría a los resultados del escenario de acercamiento. Otros modelos como ITU-R M2135-1 o *WINNER II* presentan valores de pendiente cercanos a los de las rectas de pérdidas, pero no tanto como *One-Slope model*.

Recta	Pendiente
Pérdidas totales enlace (dB) acercamiento continuo	0,9304
Pérdidas totales enlace (dB) acercamiento con pausas	1,1047
PL (dB) WINNER II	1,87
PL (dB) ITU-R M2135-1	1,69
PL (dB) ITU-R P1238-8	3
PL (dB) One-Slope model	1,4
PL (dB) Linear-Slope model	2,4774
PL (dB) Multi walls multi floors model (MWM)	2
Pérdidas espacio libre: L_{FS} (dB)	2

Tabla 27. Pendiente de las rectas de pérdidas en el enlace y de los modelos de propagación teóricos para el escenario de acercamiento.

6.2.2 Escenario B: Distanciamiento

Para esta última campaña se llevaron a cabo procesos de medida idénticos a los efectuados para el escenario de acercamiento, con la notable diferencia de que en este caso se realizaría un movimiento de distanciamiento.

En la Figura 48 se muestran las rectas de pérdidas por distanciamiento continuo y con pausas, así como los distintos modelos de propagación teóricos. En ella podemos apreciar como el distanciamiento con pausas presenta de media 9 dB más de pérdidas que el distanciamiento continuo, al contrario de lo que veíamos para el Escenario A en el apartado anterior, donde el acercamiento continuo presentaba más pérdidas que el acercamiento con pausas.

Cabe destacar que como ya sucediera en las medidas de acercamiento, las pendientes de las rectas que modelan las pérdidas por distanciamiento continuo y distanciamiento con pausas son de nuevo muy similares. Además, el modelo de propagación teórico cuya pendiente es la más parecida a estas dos últimas sería *One-Slope model*. Todos los valores de las pendientes de las rectas para el escenario de distanciamiento han quedado recogidos en la Tabla 28.

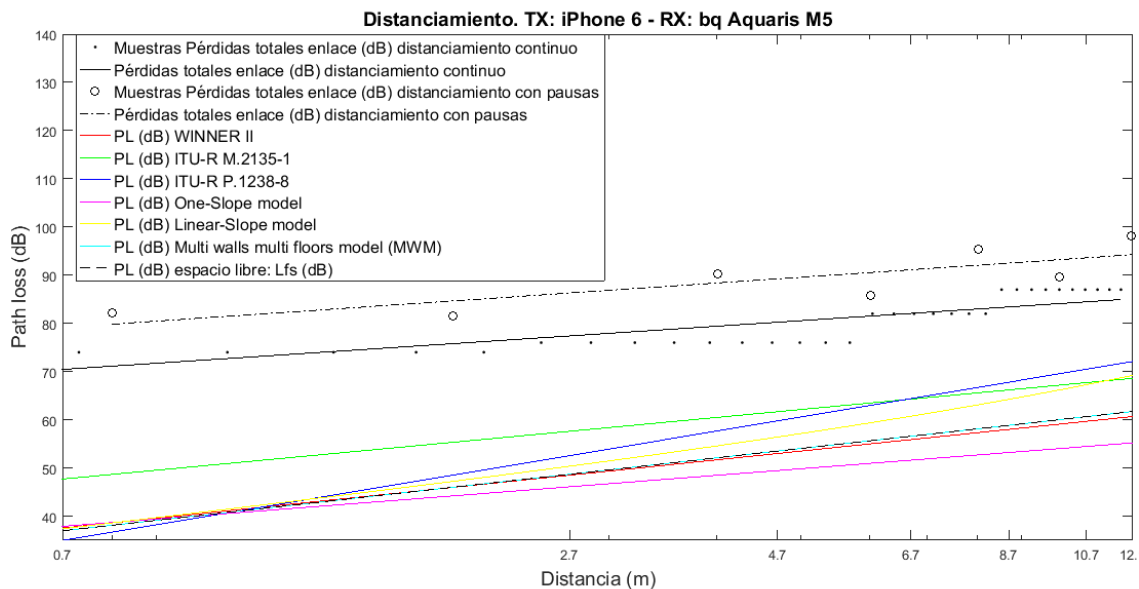


Figura 48. Representación gráfica de las pérdidas del enlace y de los modelos teóricos de propagación en el escenario de distanciamiento.

Recta	Pendiente
Pérdidas totales enlace (dB) distanciamiento continuo	1,1847
Pérdidas totales enlace (dB) distanciamiento con pausas	1,222
PL (dB) WINNER II	1,87
PL (dB) ITU-R M2135-1	1,69
PL (dB) ITU-R P1238-8	3
PL (dB) One-Slope model	1,4
PL (dB) Linear-Slope model	2,4774
PL (dB) Multi walls multi floors model (MWM)	2
Pérdidas espacio libre: L_{FS} (dB)	2

Tabla 28. Pendiente de las rectas de pérdidas en el enlace y de los modelos de propagación teóricos para el escenario de distanciamiento.

6.2.3 Comparativa de resultados para medidas dinámicas

A modo de comparativa, se han representado en la Figura 49 todas las rectas de pérdidas del enlace de los procesos de acercamiento y distanciamiento.

De dicha representación se extrae que las máximas pérdidas se dan para el escenario de distanciamiento, concretamente para las medidas de distanciamiento con pausas. Este hecho se debe a que los dispositivos transmisor y receptor eran portados por dos personas en los bolsillos delanteros de sus pantalones durante la campaña de medidas, por tanto, para las medidas de distanciamiento el efecto del cuerpo produce unas pérdidas adicionales a las que se dan en las medidas de acercamiento.

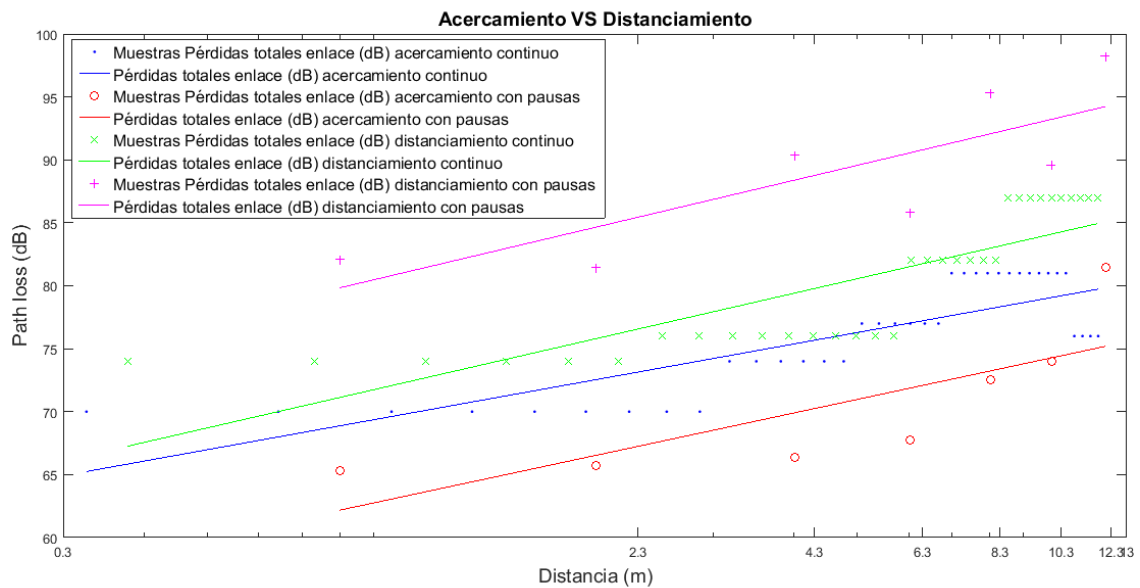


Figura 49. Representación gráfica de las pérdidas del enlace para los escenarios de acercamiento y distanciamiento.

Capítulo 7. Conclusiones y propuestas de trabajo futuro

7.1 Conclusiones

Con la realización de este Trabajo Fin de Grado se ha desarrollado un método para el cálculo de las pérdidas únicamente para determinados escenarios y dispositivos.

La elección de las aplicaciones empleadas en los dispositivos era un punto clave, siendo la capacidad de exportación de datos el factor requerido más importante. Tanto *Acrylic Wi-Fi Professional* para el dispositivo receptor *Acer Aspire 5575G*, como *Network Monitor* para *bq Aquaris M5* dieron los resultados esperados y cumplieron con su función, facilitando de forma importante el proceso del tratamiento y análisis de los datos.

Se han llevado a cabo diversas campañas de medida, tanto estáticas como dinámicas, en las que se han recreado diferentes escenarios: visión directa (LOS), sin visión directa (NLOS), difracción, efecto de tabiques, etc. La comparación de los resultados de cada una de las campañas con los modelos de propagación *indoor* experimentales, ha permitido identificar cuál de dichos modelos se ajustaba mejor a nuestros datos, y en la mayoría de los casos ha sido *One-Slope model* el que mostraba un comportamiento más similar, dentro de las limitaciones que nuestro método presenta.

El método desarrollado en este trabajo, aunque únicamente sería aplicable a los dispositivos y escenarios aquí planteados, permitiría estimar el alcance de un enlace conociendo previamente el valor de la potencia transmitida (P_{TX} (dBm)) y la sensibilidad del receptor (S (dBm)). Con ambos parámetros y los valores de pérdidas totales dados por el propio método sería suficiente para calcular dicho alcance.

Otra de las aplicaciones que podría tener nuestro método sería la posible implementación de un algoritmo de control de potencia para los dispositivos transmisores implicados en la comunicación. Si el dispositivo, mediante el uso de un método como el nuestro, puede conocer las pérdidas que se dan en un determinado enlace, y además es sabida la sensibilidad del receptor en cuestión, podría ejercer un control sobre la potencia transmitida de forma que se satisfagan las necesidades en recepción sin necesidad de transmitir la máxima potencia.

Tres son los inconvenientes más importantes con los que ha topado el trabajo. Por un lado destaca el desconocimiento de los valores de ganancia de los dispositivos móviles, razón que no ha permitido un estudio más exacto de las pérdidas totales. Por otro lado, la sencillez de los dispositivos y aplicaciones empleados en el trabajo, los cuales están al alcance de cualquier persona, limitan la precisión de las medidas y con ello de los resultados. Finalmente, y en consecuencia de las deficiencias anteriores, resulta que el método diseñado no es posible

extrapolarlo para otros dispositivos o entornos, por lo que únicamente es válido para los dispositivos y escenarios expuestos en esta memoria.

7.2 Propuestas de trabajo futuro

A lo largo de la realización de cualquier proyecto, aparecen de forma constante infinidad de posibles líneas de trabajo, siendo imposible atenderlas todas por la necesidad de acotar únicamente el objeto de estudio inicialmente definido. A continuación se muestran, en el caso de que éste proyecto sirviera de base en el futuro para nuevos trabajos, propuestas para la mejora del mismo.

- Como ya se ha reiterado en numerosas ocasiones, la utilización de equipos de medida de laboratorio (analyzer de redes, medidor de campo, etc.), y no los dispositivos de usuario con los que se ha desarrollado este trabajo, ayudarían a obtener unos resultados más exactos y se reduciría notablemente el margen de error en las medidas.
- En relación a la mejora anterior, sería conveniente conocer detalladamente todas las características de los dispositivos de medida implicados en la medición (ganancias de las antenas y pérdidas en cables y conectores en TX y RX), a fin de poder extrapolar los resultados de dichas medidas para otros dispositivos.
- Recrear nuevos escenarios de medida, tanto estáticos como dinámicos, de forma que se pueda conocer de manera aún más completa el objeto de análisis.
- Ampliar el estudio realizado en éste proyecto a los futuros estándares IEEE 802.11 de alta velocidad, en el momento en que su maduración e implantación sean suficientes para llevarlo a cabo.

Bibliografía

- [1] MARTÍNEZ ABIÉTAR, A. Transparencias de la asignatura Tecnologías y Sistemas en Redes de Acceso del Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación.
- [2] BAHAI S, AR y SALTZBERG, BR. (2002). *Multi-Carrier Digital Communications Theory and Applications of OFDM*. New York: Kluwer Academic Publishers.
- [3] PEDRAZA, L., HERNÁNDEZ, C y BALLESTEROS, DM. (2011). [imagen digital en línea]. *Modelo del desvanecimiento selectivo en frecuencia*. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-62302011000200012 [Consulta: 1 de junio de 2017]
- [4] PR NEWSWIRE. *US Wi-Fi households to own average of 11 wi-fi devices in 2017 says strategy analytics*. (2014). [imagen digital en línea]. Disponible en: <http://www.prnewswire.com/news-releases/us-wi-fi-households-to-own-average-of-11-wi-fi-devices-in-2017-says-strategy-analytics-247305921.html> [Consulta: 28 de mayo de 2017]
- [5] CARBALLAR FALCÓN, JA. (2004). *Wi-Fi: cómo construir una red inalámbrica*. Madrid: RA-MA editorial.
- [6] HUIDOBRO MOYA, JM y ROLDÁN MARTÍNEZ, D. (2006). *Comunicaciones en redes WLAN*. Madrid: Creaciones copyright, S.L.
- [7] IEEE STANDARDS ASSOCIATION. *IEEE Get Program: IEEE 802.11 Wireless LANs*. <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.11.html> [Consulta: 28 de mayo de 2017]
- [8] PEREIRA, D. (2016). *CEVA. Wi-Fi for IoT: Overcoming Connectivity Standard Fragmentation Using a Software-Defined Modem*. [imagen digital en línea]. Disponible en: <http://www.ceva-dsp.com/ourblog/wi-fi-for-iot-overcoming-connectivity-standard-fragmentation-using-a-software-defined-modem/> [Consulta: 28 de mayo de 2017]
- [9] MORENO MARTÍN, M. (2015). *Análisis, diseño y despliegue de una red WiFi en Santillana del Mar*. Proyecto fin de Carrera. Universidad Autónoma de Madrid.
- [10] UNIVERSIDAD NACIONAL DE MAR DEL PLATA. FACULTAD DE INGENIERÍA, DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA. *Capítulo 9: Introducción a 802.11*. <http://www3.fi.mdp.edu.ar/electronica/catedras/redesdedatos/files/9Intro802.11.mod.pdf> [Consulta: 12 de junio de 2017]
- [11] *Vodafone te ayuda*. (2015). [imagen digital en línea]. Disponible en: <https://www.vodafoneayuda.es/2015/03/como-mejorar-la-calidad-de-tu-conexion-inalambrica/> [Consulta: 26 de mayo de 2017].
- [12] CARRILLO PADILLA, WR. (2013). *Análisis y procesado de medidas de parámetros de banda estrecha utilizando un smartphone con sistema operativo Android*. Trabajo fin de Master. Universitat Politècnica de València.

- [13] NAVARRO GAVIRA, S. (2007). *Algoritmos cross-layer para la optimización de las prestaciones del tcp en redes wireless ad-hoc* [imagen digital en línea]. Universidad de Sevilla. [Consulta: 25 de mayo de 2017]. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11306/fichero/TEORIA%252F07++Capitulo+2.pdf>
- [14] UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA. ÁREA DE INGENIERÍA TELEMÁTICA. *Redes inalámbricas 802.11 y acceso al medio*. https://www.tlm.unavarra.es/~daniel/docencia/arss/arss09_10/slides/31y32-CSMA-CA.pdf [Consulta: 25 de mayo de 2017]
- [15] CISCO SUPPORT COMMUNITY. *802.11 frames: A starter guide to learn Wireless sniffer traces*. <https://supportforums.cisco.com/document/52391/80211-frames-starter-guide-learn-wireless-sniffer-traces> [Consulta: 25 de mayo de 2017]
- [16] DE ANTONIO, M. (2016). *Wi-Fi: entendiendo los dB, dBm y RSSI*. <http://maneldeantonio.com/dbs-dbm-rssi> [Consulta: 24 de mayo de 2017].
- [17] RIERA SALÍS, JM. (2008). *Regulación técnica de los sistemas Wi-Fi*. https://www.rediris.es/eventos/foro-wifi/2008/wifi_salud_2.pdf [Consulta: 24 de mayo de 2017].
- [18] METAGEEK: *WiFi Lessons*. <http://www.metageek.com/training/resources/understanding-rssi.html> [Consulta: 24 de mayo de 2017]
- [19] FLORES ASENJO, SJ. (1998). *Caracterización del canal radio móvil en el interior de edificios con múltiples plantas mediante técnicas de lanzamiento de rayos*. Tesis doctoral no publicada. Universitat Politècnica de València. doi:10.4995/Thesis/10251/5762.
- [20] MATEU, M. *Caracterización del canal de radio. Propagación en entornos urbanos*. https://eva.fing.edu.uy/pluginfile.php/63614/mod_resource/content/1/Canal_Radio_parte1.pdf [Consulta: 16 de mayo de 2017].
- [21] RAFAEL DAZA, J. y JACOME MEZA, A. (2011). *Banda angosta o estrecha*. <https://comunicationsone.wordpress.com/2011/01/19/banda-angosta-o-estrecha/> [Consulta: 18 de mayo de 2017].
- [22] CALDERÓN COLMENARES, JJ. (2012). *Estimación de la cobertura de los servicios de comunicaciones móviles 2G/3G en interiores a partir de medidas drive test*. Trabajo fin de Master. Universitat Politècnica de València.
- [23] ZYLOUD, A., JALEL, C., HADI HABAEBI, M., RAFIQUUL ISLAM, MD. Y ZEKI, AM. (2013). *Comparison of Empirical Indoor Propagation Models for 4G Wireless Networks at 2.6 GHz*. International Islamic University Malaysia (IIUM). <https://goo.gl/POZOrP> [Consulta: 1 de junio de 2017].
- [24] ITU-R (2009). *Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced*. ITU-R M.2135-1. Ginebra, 2010.
- [25] ITU-R (2015). *Datos de propagación y métodos de predicción para la planificación de sistemas de radiocomunicaciones en interiores y redes radioeléctricas de área local en la gama de frecuencias de 300 MHz a 100 GHz*. ITU-R P.1238-8. Ginebra, 2016.
- [26] RUBIO ARJONA, L. *Transparencias de la asignatura Radiocomunicaciones del Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación*.
- [27] COST 231 (1999). *Digital mobile radio towards future generation system*. COST 231 Final report. <http://grow.tecnico.ulisboa.pt/~grow.daemon/cost231/> [Consulta: 4 de junio de 2017].

Anexos

Anexo I: Código base de *Matlab* para el análisis de las pérdidas

A continuación se presenta un código base de *Matlab* como los usados en el análisis de los datos. El código que aquí mostramos estaría enfocado a analizar las medidas de un escenario con visión directa (LOS). Evidentemente, para cualquier otro escenario, las fórmulas y parámetros del código cambiarían, atendiendo a la teoría sobre modelos de propagación teóricos en escenarios *indoor* vista en el Capítulo 4.

```
%% ESCENARIO x

%% VECTORES DE VALORES DE DISTANCIA

d1=[]; % Vector de distancias para las medidas reales

d2=[]; % Vector de distancias con múltiples puntos para la simulación
de los
    % modelos de propagación teóricos

%% VECTOR DE PÉRDIDAS EN EL ENLACE

L=[]; % A partir de los valores de potencia recibida captados por los
    % dispositivos receptores, y conociendo la potencia transmitida
    % por el transmisor, se declara el vector L de pérdidas en el
enlace

%% AJUSTE Y REPRESENTACIÓN DEL VECTOR DE PÉRDIDAS

p1=polyfit(10*log10(d1),L,1);
L1=10*log10(d1)*p1(1)+p1(2);
semilogx(d1,L,'.k',d1,L1,'k');
hold on

% Mediante la función polyfit de Matlab se obtiene un polinomio de
% grado n=1, el cual corresponda a una recta.
% Posteriormente se hace uso de la función semilogx para representar
% en un eje logarítmico la recta de valores ajustados de L.

%% MODELOS TEÓRICOS DE PROPAGACIÓN INDOOR
```

```

%% 1.WINNER II
f_GHz=2.4; % Para el modelo WINNER II, el valor de frecuencia se
expresa en GHz
PL_winner=18.7*log10(d2)+46.8+20*log10(f_GHz/5);

% El modelo de propagación WINNER II presenta distintas formulaciones
% en función de si el escenario es LOS o NLOS. En éste código base de
% ejemplo se muestra la fórmula del modelo para escenario LOS.

    %% AJUSTE Y REPRESENTACIÓN DEL MODELO WINNER II
    p2=polyfit(10*log10(d2),PL_winner,1);
    semilogx(d2,PL_winner,'r');
    hold on

    % La función polyfit se usa en el ajuste de los modelos de
    % propagación únicamente para conocer el valor de pendiente de la
    % recta que los representa.
    % Para la representación con semilogx se utiliza en este caso el
    % vector de distancias d2, especialmente definido para los modelos
    % teóricos.

%% 2.ITU-R M.2135-1 Model
f_GHz=2.4; %GHz
PL_ITU2135=16.9*log10(d2)+32.8+20*log(f_GHz);

    %% AJUSTE Y REPRESENTACIÓN DEL MODELO ITU-R M.2135-1 Model
    p3=polyfit(10*log10(d2),PL_ITU2135,1);
    semilogx(d2,PL_ITU2135,'g');
    hold on

%% 3.ITU-R P.1238-8 Model
f_MHz=2400; % MHz

% El modelo ITU-R P.1238-8 es el primero de los que analizamos en este
% script que presenta parámetros dependientes del escenario de media
% en su formulación. Como éste código analiza la situación de
% comunicación en visión directa, se han tomado los valores que se ven
% a continuación, aunque para otros posibles escenarios dichos valores
% cambiarían.

N=30; % Valor propio para un edificio residencial y una frecuencia de
      % 2.4GHz
L_f=0; % Para un escenario de LOS, no existen suelos de por medio en
      % la comunicación, por tanto las pérdidas por penetración en el
      % suelo (L_f) se igualan a 0.

PL_ITU1238=20*log10(f_MHz)+ N*log10(d2)+L_f-28;

    %% AJUSTE Y REPRESENTACIÓN DEL MODELO ITU-R 9.1238-7 Model
    p4=polyfit(10*log10(d2),PL_ITU1238,1);
    semilogx(d2,PL_ITU1238,'b');
    hold on

%% 4.MODELOS DE PROPAGACIÓN COST 231

%% 4.1.One slope model (OSM)
lambda=3e8/2.4e9;
L_0=20*log10((4*pi)/lambda); % Perdidas LFS a 1m de distancia
n=1.4; % Valor teórico establecido para una situación de transmisión

```

```

    % en pasillos

PL_OSM=L_0+10*n*log10(d2);

    %% AJUSTE Y REPRESENTACIÓN DEL MODELO One slope model (OSM)
p5=polyfit(10*log10(d2),PL_OSM,1);
semilogx(d2,PL_OSM,'m');
hold on

%% 4.2.Linear slope model (LSM)
f_GHz=2.4; %GHz
Lfs=20*log10(d2)+20*log10(f_GHz)+32.45; %perdidas en espacio libre
alpha=0.62; % Valor teórico establecido para una situación de
            % transmisión en el mismo piso

PL_LSM=Lfs+alpha*d2;

    %% AJUSTE Y REPRESENTACIÓN DEL MODELO Linear slope model (LSM)
p6=polyfit(10*log10(d2),PL_LSM,1);
semilogx(d2,PL_LSM,'y');
hold on

%% 4.3.Multi walls multi floors model (MWM)
Lc=0;
Kw1=0;
Kw2=0;
Lw1=0;
Lw2=0;
Kf=0;
Lf=0;
b=0.46;

PL_MWM=Lfs+Lc+Kw1*Lw1+Kw2*Lw2+Lf*Kf^(((Kf+2)/(Kf+1))-b);

    %% AJUSTE Y REPRESENTACIÓN DEL MODELO Multi walls multi floors
model (MWM)
p7=polyfit(10*log10(d2),PL_MWM,1);
semilogx(d2,PL_MWM,'c');
hold on

%% 5.Lfs: pérdidas en espacio libre
f_GHz=2.4; %GHz
Lfs=20*log10(d2)+20*log10(f_GHz)+32.45;

    %% AJUSTE Y REPRESENTACIÓN DE Lfs
pfs=polyfit(10*log10(d2),Lfs,1);
%L_fs=10*log10(d2)*pfs(1)+pfs(2);
semilogx(d2,Lfs,'--k');

%% TÍTULO, NOMBRE DE LOS EJES Y LEYENDA DE LA GRÁFICA RESULTANTE

title('Visión directa (LOS). TX: iPhone 6 - RX: Acer Aspire
5575G','FontSize',14)
xlabel('Distancia (m)','FontSize',14) % Etiqueta el eje horizontal
ylabel('Path loss (dB)','FontSize',14) % Etiqueta el eje vertical
legend('Muestras Pérdidas totales enlace (dB)','Pérdidas totales
enlace (dB)','PL (dB) WINNER II','PL (dB) ITU-R M.2135-1','PL (dB)
ITU-R P.1238-8','PL (dB) One-Slope model','PL (dB) Linear-Slope

```

```
model', 'PL (dB) Multi walls multi floors model (MWM)', 'Pérdidas  
espacio libre: Lfs (dB)');  
hold on
```